

CLAUDIA MILENA HERNÁNDEZ BONILLA



DETECCIÓN DE SEÑAL EN UN SISTEMA MIMO EMPLEANDO
OPTIMIZACIÓN BASADA EN COLONIAS DE HORMIGAS

Tesis de Maestría

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán
2011

CLAUDIA MILENA HERNÁNDEZ BONILLA

DETECCIÓN DE SEÑAL EN UN SISTEMA MIMO EMPLEANDO
OPTIMIZACIÓN BASADA EN COLONIAS DE HORMIGAS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del título de

Magister en
Electrónica y Telecomunicaciones.

Director
Dr. Pablo Emilio Jojoa Gómez

Popayán
2011

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de vivir y culminar esta etapa de mi carrera.

A mi familia por cederme muchas horas de su tiempo para la realización de este trabajo.

A Víctor por su amor y apoyo incondicional, los que constituyeron un soporte para la finalización de este trabajo.

Al Doctor Pablo Emilio Jojoa Gómez por guiarme en la realización de esta tesis, su apoyo permanente permitió la consecución de las metas trazadas.

Al Magister Víctor Quintero Flórez y la Doctora Cristina Gómez Santamaría por sus aportes en la etapa de evaluación de esta tesis.

A todas las personas que en algún momento me brindaron soporte con sus conocimientos o experiencias.

Resumen

Los usuarios de los servicios de telecomunicaciones cada vez demandan mayores prestaciones a los operadores y se espera que los sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) sean capaces de satisfacer estas necesidades, para ello es necesario proveer mecanismos que permitan la implementación de estos sistemas y facilitar su máximo aprovechamiento. La detección es una etapa crítica considerando que la complejidad del sistema se puede incrementar considerablemente a medida que se mejora el desempeño del algoritmo de detección, lo que se constituye en un problema de tipo NP (NP, *Non-Deterministic Polynomial Time*). Al respecto se han desarrollado diferentes investigaciones que buscan reducir el número de operaciones matemáticas asociadas al algoritmo de detección y mejorar su desempeño. En los últimos años se han empleado las metaheurísticas para solucionar problemas NP, logrando resultados satisfactorios en la solución de problemas de optimización combinatoria.

Un tipo de metaheurística que ha sido aplicada para la solución de problemas NP es la Optimización basada en Colonias de Hormigas, esta se basa en modelar computacionalmente el comportamiento de las hormigas en su búsqueda de alimento, ya que siempre encuentran el camino más corto entre el hormiguero y la comida, por lo tanto sirven para minimizar parámetros en un problema.

En esta tesis se aplicó y adaptó una metodología para simulación de sistemas de telecomunicaciones (Astaiza y Bermúdez, 2006), lo que permitió diseñar e implementar dos algoritmos de detección de señal según los principios de la Optimización Basada en Colonias de Hormigas. Los algoritmos se evaluaron en un

sistema de comunicación de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas MIMO 2x2 y 4x4, considerando modulación QPSK. Los resultados obtenidos por medio de la simulación a nivel físico muestran que con esta nueva aproximación se logran resultados comparables a los obtenidos con algoritmos ampliamente utilizados para la detección de señal en sistemas MIMO.

Palabras Clave: Detección, Sistemas MIMO, Algoritmos de Colonias de Hormigas, Desempeño.

Abstract

The users of telecommunications services increasingly demand greater benefits to operators, it is expected that the Systems of Multiple Input Multiple Output (MIMO) will be to meet these needs, for this, it is necessary to provide mechanisms for implementing these systems and to facilitate their maximum use. The detection is a critical step considering that the complexity of the system is dramatically increased in the same way as the detection algorithm performance is improved, which is a Non-deterministic Polynomial time (NP) problem; Different studies have been developed aiming to reduce the number of mathematical operations associated with the algorithm and improve its performance. In recent years, metaheuristics have been used to solve NP problems, achieving satisfactory results in solving combinatorial optimization problems.

A type of metaheuristic has been applied to solve Non-Deterministic Polynomial Time (NP) problems: Ant Colony Optimization, which is based on computationally modeling the behavior of ants in their search for food, they always find the shortest path between anthill and food, thus serving to minimizing problem parameters.

In this work a methodology was applied and adapted for simulating telecommunications systems, allowing the design and the implement two signal detection algorithms according to the principles of optimization based on ant colony. The algorithms were evaluated in a communication system of Multiple Inputs and Multiple Outputs (MIMO) 2x2 and 4x4 MIMO, considering QPSK modulation. The results obtained by means of physical-level simulation show that this new approach

will achieve results comparable to those obtained with widely used algorithms for signal detection in MIMO systems.

Keywords: Detection, MIMO Systems, Ant Colony Algorithm, Performance.

Contenido

	Pág.
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
Introducción	1
1.1. Justificación de la Tesis.....	2
1.2. Contribución de la Tesis	3
1.3. Organización de la Tesis	4
Conceptos Básicos	7
2.1. Los Sistemas MIMO	7
2.1.1. Detección en MIMO	8
2.1.2. Modelo del detector de señal en MIMO	10
2.1.3. Algoritmos de detección	12
2.2. Metaheurísticas.....	15
2.3. OCH	16
2.3.1. Aplicación de OCH	19
Aplicación de la Metodología de Simulación.....	21
3.1. Definición del Sistema	21
3.2. Análisis del Sistema.....	22
3.2.1. Definición del problema	22

3.2.2. Representación del problema como un árbol	22
3.2.3. Restricciones del problema.....	25
3.2.4. Información de los trayectos de feromona.....	25
3.2.5. Inicialización del algoritmo.....	25
3.2.6.1. Construcción de la solución.....	26
3.2.6.2. Actualización de la feromona.....	28
3.2.8. Análisis de resultados	32
3.3. Formulación del Modelo del Sistema.....	32
3.4. Selección del Lenguaje	38
3.5. Codificación del Modelo	38
3.6. Experimentación.....	39
3.7. Validación del Modelo	39
3.8. Monitoreo y Control	40
Experimentación	41
4.1. Algoritmo de Detección Basado en AS (Detector AS)	42
4.1.1. Sistema MIMO 2x2	43
4.2. Algoritmo de Detección Basado en ACS (Detector ACS).....	51
4.2.1. Sistema MIMO 2x2	52
4.2.2. Sistema MIMO 4x4	55
4.3. Comparación de Resultados.....	60
4.3.1. Comparación de los detectores AS y ACS	60
4.3.2. Comparación entre algoritmos de detección	61
Conclusiones	67
Tipos de OCH	71
A.1. Ant System (AS).....	71
A.1.1. Construcción de la solución.....	71
A.1.2. Actualización de la feromona	72
A.1.3. Evaporación de la feromona	73
A.1.4. Acciones Adicionales	73
A.2. Sistema Max – Min.....	74
A.2.1. Actualización.....	74

A.2.2. Acciones adicionales	75
A.3. Sistema de Colonias de Hormigas.....	75
A.3.1. Construcción de la solución	75
A.3.2. Actualización	76
A.3.3. Acciones adicionales	76
Apéndice B	77
Descripción del Sistema en Matlab.....	77
B.1. Funciones principales.....	77
B.2. Funciones de los detectores	78
B.2.1. Fase de Inicio del Algoritmo	79
B.2.2. Fase Construcción de la solución	79
B.2.3. Fase de actualización de la feromona	79
Referencias.....	81

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1. Diagrama general de un sistema MIMO.....	8
Figura 2.2. Árbol del problema.....	12
Figura 2.3. Pasos para analizar un problema con OCH.....	18
Figura 3.1. Árbol del problema de detección sistema MIMO 2x2, QPSK.....	23
Figura 3.2. Árbol del problema de detección sistema MIMO 4x4, QPSK.	24
Figura 3.3. Pseudocódigo para el cálculo de las distancias en los Detectores ACH.....	26
Figura 3.4. Pseudocódigo para la construcción de la solución en el Detector AS.....	27
Figura 3.5. Pseudocódigo para la actualización de feromona en el Detector AS.....	29
Figura 3.6. Pseudocódigo para la construcción de la solución en el Detector ACS.....	30
Figura 3.7. Pseudocódigo para actualización de feromona en el Detector ACS.....	31
Figura 3.8. Diagrama en bloques del sistema MIMO.	33
Figura 3.9. Simulación del Sistema MIMO.....	34
Figura 3.10. Diagrama de flujo del Detector AS.....	35
Figura 3.11. Diagrama de flujo del Detector ACS.....	37
Figura 3.12. Codificación del modelo del Sistema MIMO.....	38
Figura 4.1. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 2x2.....	43
Figura 4.2. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando α en un sistema MIMO 2x2.	44
Figura 4.3. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 2x2.	45
Figura 4.4. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el detector AS en un sistema MIMO 2x2.	46

Figura 4.5. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 4x4.	47
Figura 4.6. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando α en un sistema MIMO 4x4.	48
Figura 4.7. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 4x4.	49
Figura 4.8. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el detector AS en un sistema MIMO 4x4.	50
Figura 4.9. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 2x2.	52
Figura 4.10. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando α en un sistema MIMO 2x2.	53
Figura 4.11. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS en un sistema MIMO 2x2.	55
Figura 4.12. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 4x4.	56
Figura 4.13. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando α en un sistema MIMO 4x4.	57
Figura 4.14. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 4x4.	58
Figura 4. 15. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS en un sistema MIMO 4x4.	59
Figura 4. 16. Comparación Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para los Detectores AS y ACS.	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 4.1. Parámetros del Detector AS.....	42
Tabla 4.2. Parámetros del Detector ACS.	51
Tabla 4.3. Comparación de las curvas de desempeño de diferentes algoritmos en el sistema MIMO 2x2.	62
Tabla 4.4. Diferencias en SNR para diferentes niveles de BER en el sistema MIMO 2x2.....	62
Tabla 4.5. Comparación de las curvas de desempeño de diferentes algoritmos para el sistema MIMO 4x4.	64
Tabla 4.6. Diferencias en SNR para diferentes niveles de BER en el sistema MIMO 4x4.....	64

Lista de Abreviaturas

- 3G: Tercera Generación, *Third Generation*.
- 4G: Cuarta Generación, *Fourth Generation*.
- ACH: Algoritmo de Optimización Basado en Colonias de Hormigas.
- ANTS: Búsqueda en Árbol Aproximada no Determinística, *Approximate Nondeterministic Tree Search*.
- AS: Sistema de Hormigas, *Ant System*.
- AWGN: Ruido Gaussiano Blanco Aditivo, *Additive White Gaussian Noise*.
- BER: Tasa de Error de Bit, *Bit Error Rate*.
- ES: Sistema de Hormigas Elitista, *Elitist Ant System*.
- HCF ACO: Framework Hyper-Cube para Optimización basada en Colonias de Hormigas, *Hyper-Cube Framework for ACO*.
- MIMO: Múltiples Entradas Múltiples Salidas, *Multiple Input Multiple Output*.
- ML: Máxima Verosimilitud, *Maximum likelihood*.
- MMAS: Sistema de Hormigas Máximo – Mínimo, *MAX - MIN Ant System*.

MMSE DFE: Ecualizador Realimentado de Error Cuadrático Medio Mínimo, *Minimum Mean Square Decision Feedback Equalizer*.

MMSE: Mínimo error cuadrático medio, *Minimum Mean Square Error*.

NP: No Polinomial, *Non-deterministic Polynomial time*.

OCH: Optimización Basada en Colonias de Hormigas.

QPSK: Modulación de fase en Cuadratura, *Quadrature Phase Shift Keying*.

RA: Sistema de Hormigas basado en el rango, *Rank-based Ant System*.

SD: Detector Esférico, *Sphere Detector*.

SE: *Schnoch Euchnerr*.

ZF DFE: Ecualizador Realimentado de Decisión Forzado a Cero, *Zero Forcing Decision Feedback Equalizer DFE*.

ZF: Forzado a Cero, *Zero Forcing*.

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de comunicación de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) fueron concebidos desde hace varias décadas, sin embargo diversos aspectos han atrasado su implementación en las redes de comunicaciones por las limitaciones existentes en capacidades de procesamiento, tamaño de los equipos y costos asociados al despliegue de la red.

Los sistemas MIMO brindan a las redes grandes capacidades con altas velocidades de transmisión de datos, por lo tanto se constituyen en la base de los sistemas de tercera y cuarta generación de comunicaciones móvil celular (3G y 4G). Sin embargo, la detección de señal es un proceso complejo por la existencia de múltiples señales que arriban al receptor, y como tal se constituye en un problema de tipo NP (NP, *Non-Deterministic Polynomial Time*). Se han propuesto diferentes algoritmos o técnicas para realizar este procedimiento sin la elevada complejidad que implica el uso del algoritmo de Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), buscando facilitar la implementación práctica de estos sistemas.

Entre los mecanismos de detección se pueden nombrar los algoritmos óptimos y los subóptimos. Los primeros se caracterizan por tener un desempeño cercano al óptimo con una complejidad que se incrementa considerablemente de acuerdo al esquema

de modulación empleado en el sistema; los algoritmos subóptimos (Barbero y Thompson, 2006) tienen baja complejidad a cambio de un pobre desempeño (Othma, y Ouertani, 2008).

En las últimas décadas surgió la Optimización basada en Colonias de Hormigas (OCH), una metaheurística poblacional inspirada en el comportamiento de las hormigas en su búsqueda de alimento. OCH ha sido empleada para resolver problemas de optimización combinatoria considerados NP con resultados satisfactorios. En este trabajo se adaptan dos algoritmos de este tipo para la detección de señal en un sistema MIMO.

1.1. Justificación de la Tesis

Los usuarios de los servicios de telecomunicaciones cada vez demandan mayores prestaciones a los operadores y estos últimos a los fabricantes de equipos. Se espera que los sistemas MIMO sean capaces de satisfacer estas demandas, sin embargo es necesario proveer mecanismos que permitan la implementación práctica de dichos sistemas y facilitar su máximo aprovechamiento. La búsqueda de nuevos mecanismos que permitan reducir el número de operaciones matemáticas asociadas a un algoritmo y mejorar el desempeño de los algoritmos de detección de señal, brindan nuevas opciones que permiten el desarrollo a nivel de hardware de estos sistemas, con el fin de realizar pruebas en entornos reales y facilitar los procesos de adopción de los sistemas MIMO.

Para el diseño del detector de señal en un sistema MIMO, se escogió OCH porque esta metaheurística está siendo ampliamente estudiada y analizada en diferentes áreas del conocimiento, con características únicas, como la actualización de la información basada en la calidad de las soluciones o el uso de diferentes estrategias para construir soluciones, lo que permite realizar un procesamiento más eficiente en la búsqueda de una solución. Entre las metaheurísticas poblacionales, OCH se destaca como una de las mejores técnicas de solución de problemas (Alonso; et al., 2004).

En este trabajo se analiza un sistema punto a punto con modulación QPSK, debido a las restricciones asociadas con el tiempo de procesamiento y los recursos con los que se cuenta para el desarrollo de la tesis. Es importante tener en cuenta que dependiendo del número de antenas y del número de elementos de la constelación de la señal recibida, la complejidad computacional del algoritmo de detección se incrementa.

El adecuado desempeño de la etapa de detección de señal en un sistema MIMO, es objeto de investigación constante por los fabricantes de equipos y grupos de investigación internacionales, por lo tanto es necesario que en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) se aporte en el estudio de mecanismos que permitan solucionar los problemas asociados a la detección de señal en sistemas MIMO y se apropien los conocimientos necesarios para el aprovechamiento de las capacidades de dichos sistemas en las redes de telecomunicaciones.

1.2. Contribución de la Tesis

Continuamente se realizan investigaciones sobre diferentes aproximaciones para la detección de señal en un sistema MIMO. Con este trabajo se brinda una adaptación de los algoritmos de OCH a la detección de señal en sistemas MIMO. Para lograr esto, se aplicó una metodología para simulación de sistemas de telecomunicaciones la cual facilitó el proceso de adaptación, diseño, implementación y validación del funcionamiento de los algoritmos.

Se adaptaron, diseñaron e implementaron en Matlab dos algoritmos para detección de señal en sistemas MIMO 2x2 y 4x4: el Algoritmo de Detección MIMO basado en el Sistema de Hormigas (Detector AS) y el Algoritmo de Detección MIMO basado en el Sistema de Colonias de Hormigas (Detector ACS), para esto se adaptó y aplicó una metodología para simulación de sistemas de telecomunicaciones (Astaiza y Bermúdez, 2006). El desempeño de los algoritmos es comparable con el desempeño

del algoritmo ML y Schnoch Euchnerr (SE), y entre los algoritmos se logró un mejor desempeño con el Detector ACS.

El Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) de la FIET desarrolla en el área de investigación en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas trabajos relacionados con los sistemas MIMO, y se han realizado diferentes estudios enfocados al análisis y simulación de estos sistemas, centrándose en la etapa de detección. Con esta tesis se aporta con dos algoritmos que pueden ser empleados para la detección de señal en dichos sistemas, lo que constituirá un punto de partida para la adaptación y desarrollo de otros algoritmos.

La adaptación, diseño e implementación de los algoritmos fueron publicados en la Edición No 8 de la revista Entre Ciencia e Ingeniería de la Universidad Católica Popular del Risaralda mediante el artículo titulado “Detección de Señal en un Sistema MIMO empleando Algoritmos de Colonias de Hormigas”, cuya publicación se realizó en el mes de Diciembre de 2010 (Hernández y Jojoa, 2010).

Los resultados del trabajo se presentaron en la IV Conferencia Científica de Telecomunicaciones Tecnologías de la Información y las Comunicaciones mediante el artículo “Detector de Señal para un Sistema de Comunicación de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas Basado en Algoritmos de Colonias de Hormigas”, este evento fue realizado en Quito los días 6,7 y 8 de Julio de 2011.

1.3. Organización de la Tesis

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

Capitulo 1. Introducción al trabajo final de maestría.

Capitulo 2. Conceptos básicos.

Capitulo 3. Aplicación de la metodología de simulación.

Capítulo 4. Experimentación.

Capítulo 5. Conclusiones.

Apéndice A. Tipos de OCH.

Anexo A. Descripción del Sistema en Matlab.

Capítulo 2

Conceptos Básicos

Este capítulo introduce características generales sobre los Sistemas de Comunicación de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) empleados en los sistemas de tercera y cuarta generación de comunicaciones móvil celular, con el fin de brindar altas capacidades de transmisión de datos. También se analiza la metaheurística de OCH, explorando sus principales características y aplicaciones. Estos conceptos se relacionan para adaptar dos algoritmos empleados en la detección de señal en sistemas MIMO.

2.1. Los Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO están conformados por múltiples antenas en el transmisor y en el receptor, han sido estudiados desde hace más de una década por Foschini, Tarok y Telatar (Foschini y Gans, 1998; Telatar, 1999). En la figura 2.1 se presenta un sistema MIMO 2x2 (Gestbert, et al., 2003; Bolcskei, et al., 2005), donde en el lado de transmisión se tienen dos antenas transmisoras y en el receptor se tienen dos

antenas receptoras y el canal se modela como una matriz (H) cuyo tamaño depende del número de entradas y salidas del sistema.

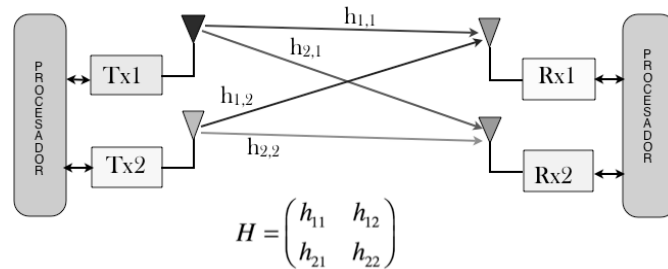


Figura 2.1. Diagrama general de un sistema MIMO.

Estos sistemas permiten incrementar la capacidad o la calidad de una comunicación, de acuerdo al esquema de funcionamiento empleado, diversidad espacial o multiplexación espacial. En diversidad espacial, se puede incrementar la calidad del sistema debido a que se transmite la misma información por todas las antenas, lo cual permite mitigar los efectos del desvanecimiento que sufre la señal cuando atraviesa el canal radio.

En cambio, con el esquema de multiplexación espacial se incrementa la capacidad del sistema dado que por cada antena se transmite información diferente, incrementando la velocidad de transmisión de datos y acercándose a la capacidad teórica del canal. Sin embargo, uno de los principales problemas de este esquema es la detección de señal en el receptor, la cual afecta el desempeño del sistema.

2.1.1. Detección en MIMO

La detección de señal en un sistema MIMO involucra la decodificación de señales complejas en el receptor, una labor más complicada que la desarrollada en un sistema de una sola antena en transmisión y recepción. El desempeño del sistema MIMO depende fuertemente del algoritmo de detección empleado en el receptor, por tanto, se han realizado continuas investigaciones entre las cuales se destacan las enfocadas en la búsqueda de esquemas de detección, que permiten la implementación práctica de dichos sistemas (Artez, et al., 2003; Waters y Barry, 2008).

Para los sistemas MIMO se encuentran principalmente dos tipos de detectores por un lado, están los detectores óptimos basados en el algoritmo esférico y el algoritmo Schnor – Euchner, los cuales tienen una complejidad que se incrementa rápidamente de acuerdo con el tamaño de la constelación de la señal que llega al receptor y se caracterizan por tener un desempeño cercano al óptimo; por otro lado, están los detectores subóptimos como el Forzado a Cero (ZF, *Zero Forcing*), Ecuilizador Realimentado de Decisión Forzado a Cero (ZF DFE, *Zero Forcing Decision Feedback Equalizer DFE*), Error Cuadrático Medio Mínimo (MMSE, *Minimum Mean Square Error*), y Ecuilizador Realimentado de Error Cuadrático Medio Mínimo (MMSE DFE, *Minimum Mean Square Decision Feedback Equalizer*) (Barbero y Thompson, 2006) los cuales tienen baja complejidad pero pobre desempeño (Othma y Ouertani, 2008).

La solución óptima en la etapa de detección de un sistema MIMO es el algoritmo ML, sin embargo, su alta complejidad lo hace poco práctico y es considerado como un problema de tipo NP, porque la complejidad computacional asociada a su solución crece de forma exponencial de acuerdo con el problema específico (Bolcskei, et al., 2005).

Los problemas NP se pueden resolver de varias formas, una de ellas es empleando métodos exactos, los cuales exploran el espacio de soluciones y obtienen una solución rápida que no necesariamente es la óptima; por otro lado se tienen los métodos aproximados, que brindan una forma sencilla y aproximada de encontrar una solución con baja complejidad y baja calidad. En las últimas décadas, se han buscado técnicas que brinden una solución de alta calidad y baja complejidad a dichos problemas (Khan, et al., 2007), entre estas se destaca la metaheurística, un proceso de generación iterativa que guía a una heurística¹ subordinada para estructurar la información y encontrar eficientemente soluciones cercanas a las óptimas (Duarte, 2007; Pantrigo, 2005).

Las metaheurísticas son estrategias empleadas para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto desempeño, este término fue propuesto por Fred Glover en 1986 (Martí, 2009). Desde entonces se han presentado

¹ Heurística: Procedimientos simples a menudo basados en el sentido común que se supone que obtendrán una buena solución (no necesariamente óptima) a problemas difíciles de un modo sencillo y rápido.

múltiples procedimientos para resolver problemas de asignación de recursos, planificadores, enrutamiento vehicular (Krzysztof y Dorigo, 2008) y se han obtenido resultados satisfactorios.

Las metaheurísticas poblacionales, realizan un proceso de búsqueda manteniendo simultáneamente un conjunto de soluciones, entre las más utilizadas se encuentran los algoritmos de OCH (Marti, 2009; Krzysztof y Dorigo, 2008; Dorigo et al., 1999). Estos han sido utilizados para brindar solución a diferentes problemas de Tipo NP, por lo tanto en esta tesis se explora una forma alternativa de detección utilizando una metaheurística poblacional: los algoritmos de OCH (Duarte, 2007; Pantrigo, 2005).

2.1.2. Modelo del detector de señal en MIMO

Considerando un sistema MIMO, la señal Y en el receptor está dada por:

$$Y = HS + W \quad (2.1)$$

La señal S es un vector $M \times 1$, Y es un vector $N \times 1$, H es la matriz del canal, una matriz compleja $N \times M$, W es un vector $N \times 1$ que representa el ruido blanco gaussiano con media cero y varianza σ^2 .

La señal a la salida del detector será

$$\hat{S} = \operatorname{argmin}_{S \in S^M} |Y - HS|^2 \quad (2.2)$$

Aplicando la descomposición QR a H (Larsson, 2009).

$$H = QR \quad (2.3)$$

Si H es $N \times M$, Q es $N \times M$, Q^T es $M \times N$, R es $M \times M$

$$\hat{S} = \operatorname{argmin}_{S \in S^M} |Y - QRS|^2 \quad (2.4)$$

Multiplicando por Q^T la ecuación 2.4, considerando

$$Q^T Y = \hat{Y} \quad (2.5)$$

Se obtiene la ecuación 2.6:

$$\widehat{S}_{M \times 1} = \operatorname{argmin}_{S \in \mathcal{S}^M} |\hat{Y} - RS|^2 \quad (2.6)$$

Debido a que R es triangular superior, cada componente puede ser considerada por separado, por lo tanto el problema de estimar S, se convierte en el problema de encontrar la distancia entre dos puntos (Artez, et al., 2003; Barbero y Thompson, 2006; Othma y Ouertani, 2009).

$$d(s) = \operatorname{argmin}_{S \in \mathcal{S}^M} |\hat{Y} - RS|^2 \quad (2.7)$$

Considerando un vector de símbolos a ser enviados:

$$S^i = [S_{i1} \dots S_{iM}]^T \quad (2.8)$$

La distancia euclidiana parcial de un símbolo s en el nivel i es:

$$d_i(s^i) = d_{i+1}(s^{i+1}) + e_i(s^i) \quad i = M_t - 1 \quad (2.9)$$

$$d_{M_t+1} = 0 \quad (2.10)$$

$e_i(s^i)$ es la subdistancia entre la señal recibida y la señal transmitida en el nivel i, reemplazando la ecuación 2.7 en la ecuación 2.9:

$$d_i(s^i) = d_{i+1}(s^{i+1}) + \left| \hat{Y}_i - \sum_{j=i+1}^{M_t} R_{ij} S_j - R_{ii} S_i \right| \quad (2.11)$$

Donde S_j representa la solución de ZF.

De acuerdo al procedimiento anterior, la descomposición QR transforma el problema ML en un árbol de búsqueda, donde el número de niveles depende del número de antenas en el transmisor (M) y el número de nodos depende del número de símbolos (M_c) utilizados por el esquema de modulación.

El árbol del problema tendrá M+1 niveles, el nodo raíz se enumera en M+1 y de allí cada nivel disminuye en 1 hasta llegar a 1, las hojas del árbol se encuentran en el nivel 1. Un diagrama general de un árbol se presenta en la figura 2.2.

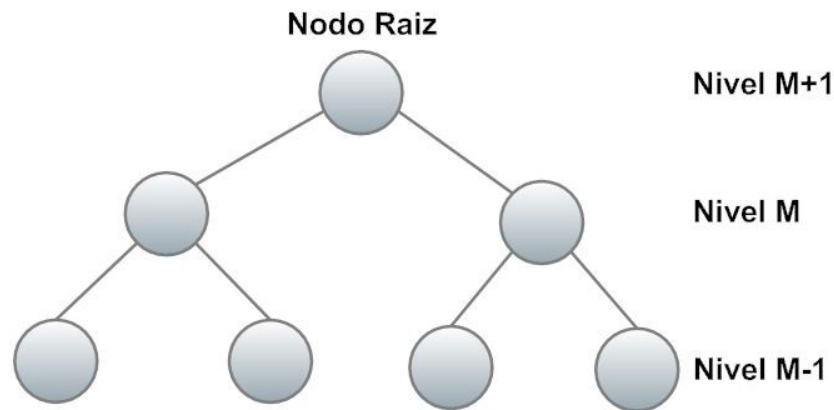


Figura 2.2. Árbol del problema.

La figura 2.2 presenta un árbol de 3 niveles con dos hijos por cada nodo, los nodos del último nivel constituyen las hojas del árbol.

2.1.3. Algoritmos de detección

Los algoritmos de detección compiten de acuerdo al desempeño en el procesamiento de la señal, es así como los detectores para sistemas con multiplexación espacial pueden ser divididos en tres clases:

- ✓ Detectores subóptimos ZF y MMSE.
- ✓ Detector de Máxima Verosimilitud ML.
- ✓ Detector Esférico (SD, *Sphere Detector*).

A continuación se presentan los algoritmos de detección mencionados.

2.1.3.1. Detectores subóptimos

2.1.3.1.1. Algoritmo de detección ZF

Es uno de los algoritmos de mayor simplicidad. El receptor ZF separa perfectamente las señales convirtiendo el canal en sub-canales paralelos, logrando la eliminación de la interferencia cocanal, sin embargo, no tiene en cuenta el efecto del ruido, generando un problema de amplificación del mismo (Mahesh, 2007).

Para resolver la ecuación 2.12 en búsqueda de los datos del vector transmitido s , se debe encontrar una matriz W que cumpla con la condición

$$WH = I \quad (2.12)$$

Donde W se expresa en la ecuación 2.13,

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (2.13)$$

Esta matriz es también conocida como la pseudo-inversa de una matriz. La solución de la ecuación 2.1 está representada en la ecuación 2.14:

$$S = WY - n, \quad (2.14).$$

Donde S es el símbolo detectado, W es la pseudo-inversa, Y es la señal recibida y n representa el ruido presente en el canal. Este es considerado un algoritmo sub óptimo por el bajo desempeño que ofrece.

2.1.3.1.2. Algoritmo de detección MMSE

MMSE es una alternativa para solucionar la interferencia cocanal y la amplificación de ruido del receptor ZF, limitando el efecto del ruido pero permite una ligera interferencia entre las señales. MMSE minimiza el total de errores generados por el ruido y la interferencia mutua entre señales cocanal .

El receptor MMSE es menos sensible al ruido, pero reduce la calidad en la separación de la señal. En caso de una SNR alta, el receptor MMSE se convierte en un receptor ZF (Mahesh, 2007).

MMSE se basa en encontrar un coeficiente de la pseudo-inversa W que minimice el criterio para resolver la ecuación 2.1, buscando los datos del vector transmitido igual que en ZF, en este caso la pseudo-inversa está dada por:

$$W = (H^H H + \text{NoI})^{-1} H^H \quad (2.15)$$

Donde N_o es la densidad de potencia de ruido e I es la matriz identidad. Al comparar la ecuación 2.13 ZF con la ecuación 2.15 MMSE, se deduce que cuando el ruido es igual a cero, las ecuaciones de la matriz pseudo-inversa son iguales. Este algoritmo tiene un mejor desempeño que ZF, sin embargo también es considerado subóptimo.

2.1.3.2. Detector de Máxima Verosimilitud

El algoritmo ML compara la señal recibida con todos los vectores posibles de señal transmitida, considerando la hostilidad del canal, la matriz de canal H , y estimando el vector de símbolo transmitido s de acuerdo al principio de máxima verosimilitud (Su, 2005):

$$\hat{S} = \operatorname{argmin}_{s \in S^M} |Y - HS|^2, \quad (2.16)$$

Donde \hat{S} es el vector de símbolo estimado. El detector busca a través del vector de la constelación, el vector que tiene más probabilidad de haber sido transmitido. Este método presenta un buen desempeño en términos de su tasa de error, pero tiene una alta complejidad computacional debido a las estimaciones que tiene que realizar para detectar el símbolo transmitido, dicha complejidad aumenta de manera exponencial con el número de antenas transmisoras y el orden de la modulación.

El número de operaciones a evaluar es 2^{ntMc} , donde nt es el número de antenas transmisoras y Mc es el orden de modulación. Para el caso de 4 antenas transmisoras y una modulación QPSK $\rightarrow 2^{4*2}=2^8=256$ comparaciones por cada vector de símbolos transmitido. Es así como la complejidad del receptor ML se incrementa y puede ser no aplicable en implementaciones reales.

2.1.3.3. Detector Esférico

El Algoritmo Esférico busca reducir la cantidad de símbolos candidatos a considerar, sin eliminar la solución ML, para eso limita la búsqueda solo a los puntos que se encuentran al interior de una esfera de radio D , definida alrededor de la señal recibida, de acuerdo a la ecuación 2.17.

$$D^2 \geq |Y - HS|^2, \quad (2.17)$$

Si $D = \infty$ la búsqueda se realiza sobre todos los posibles símbolos y la complejidad es igual a la del algoritmo ML. La reducción de la complejidad depende de la elección apropiada del radio de la esfera, si se toma un radio muy pequeño es posible que la solución óptima del algoritmo quede por fuera. Existen diferentes variantes del algoritmo esférico de acuerdo al radio de la esfera y a los mecanismos de búsqueda en el árbol del problema, estos han logrado desempeños cercanos al óptimo disminuyendo la complejidad de la solución ML (Sharmin, 2007).

2.2. Metaheurísticas

Las metaheurísticas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto desempeño. El término metaheurística fue propuesto por Fred Glover en 1986 (Marti, 2003). Desde entonces se han presentado múltiples pautas de diseño de procedimientos para resolver problemas de asignación de recursos, planificadores, enrutamiento vehicular (Krzysztof y Dorigo, 2008) y se han obtenido resultados satisfactorios.

El comportamiento experimental de la mayoría de las metaheurísticas es bueno, referido a la calidad de la solución de un problema específico y al tiempo necesario para resolverlo, por lo tanto se consideran como una alternativa factible para problemas difíciles de resolver y para encontrar una solución de calidad en un tiempo razonable (Krzysztof y Dorigo, 2008).

Se pueden definir dos tipos de metaheurísticas: las trayectoriales y las poblacionales; las primeras manejan una sola solución y realizan la búsqueda de la solución siguiendo una trayectoria en el espacio de soluciones a través de operaciones de movimientos, entre estas se destacan: búsqueda tabú, búsqueda local iterativa, métodos multiarranque, recocido simulado (Krzysztof y Dorigo, 2008).

Las metaheurísticas poblacionales, realizan un proceso de búsqueda manteniendo simultáneamente un conjunto de soluciones, las más utilizadas son: algoritmos

evolutivos, algoritmos de estimación de la distribución, optimización por colonias de hormigas y algoritmos sociales jerárquicos (Marti,2003; Krzysztof y Dorigo, 2008; Dorigo y Stutzle, 2006).

La OCH es muy efectiva para resolver problemas de optimización. Las hormigas son insectos sociales que viven en colonias, se caracterizan por buscar la sobrevivencia colectiva por encima de la individual. Otro aspecto interesante de las hormigas que ha sido investigado, es cómo pueden encontrar los caminos más cortos entre el alimento y el hormiguero (Dorigo, 1999).

Las investigaciones han demostrado que los algoritmos de OCH son muy efectivos para resolver un amplio rango de problemas que se consideran NP (Krzysztof y D.Caro, 2006; Dorigo y Stutzle, 2006; Singh, et Al., 2005). OCH, siendo una metaheurística, ha sido empleada en la solución de los problemas mencionados anteriormente, y además se empleó para resolver el problema del viajante del comercio, un problema representativo de la familia de los problemas dinámicos de optimización combinatoria, y uno de los más estudiados (Singh, et Al., 2005). A continuación se presentan los principios de funcionamiento de OCH.

2.3. OCH

Las hormigas son insectos sociales que viven en colonias, se caracterizan por buscar la sobrevivencia colectiva por encima de la individual, y pueden encontrar los caminos más cortos entre el alimento y el hormiguero (Dorigo, et al., 1999).

La OCH está inspirada en el comportamiento de las hormigas reales y sus interacciones en la búsqueda de comida. Algunas especies de hormigas "*Lasius Niger* ó *Iridomyrmex humilis*" depositan en su camino una sustancia que puede olerse, la feromona; sin rastro de feromona, las hormigas se mueven de forma aleatoria, pero si existe algún rastro, las hormigas siguen el camino marcado con la mayor concentración de feromona (Krzysztof y D.Caro, 2006).

A medida que las hormigas transitan por el mismo camino, mayor es la concentración de feromona, dado que las hormigas regresan rápidamente al hormiguero, por ser el camino más corto. Después de un tiempo, toda la colonia de hormigas se mueve por el mismo camino.

Pero las hormigas pueden quedar estancadas en una ruta que no sea la más corta, porque inicialmente se ha depositado una gran cantidad de feromona en el camino equivocado. Esta característica lleva a la colonia a un estancamiento, dado que no pueden encontrar el camino más corto, dado que la feromona no se evapora rápidamente. Este comportamiento natural debe corregirse en el algoritmo computacional para garantizar que se encuentre la mejor solución a un problema específico.

En un OCH se tiene un conjunto de agentes computacionales que trabajan en forma conjunta y se comunican mediante rastros de feromona artificial, que es evaporada de la misma forma (Dorigo, et al., 1999; Dorigo y Stutzle, 2006; Singh, et al., 2005).

El primer sistema de hormigas fue planteado por Marco Dorigo en 1992, "AS, *Ant System*", de él se mantiene el procedimiento de construcción de soluciones y la evaporación de feromona. Las principales diferencias con los algoritmos propuestos posteriormente, radican en la forma de actualización de la feromona y en algunos aspectos de la gestión de los trayectos de feromona. Entre los principales tipos de OCH se pueden nombrar: Sistema de Hormigas Elitista (ES, *Elitist AS*), Sistema de Hormigas basado en el Rango (RAS, *Rank-based AS*), Sistema de Hormigas Máximo Mínimo (MMAS, *MAX - MIN AS*), Sistema de Colonias de Hormigas (ACS, *Ant Colony System*), Búsqueda en Árbol no Determinística Aproximada (ANTS, *Approximate Nondeterministic Tree Search*) y el Framework HiperCubo para Optimización por Colonias de Hormigas (HCF – ACO, *Hyper-Cube Framework for ACO*) (Dorigo, et al., 1999; Dorigo y Stutzle, 2006; Darquennes, 2005).

En pruebas realizadas a los algoritmos en la solución del problema del viajante del comercio, se ha encontrado que todas las variantes presentan mejor desempeño que el algoritmo original AS, y entre ellas se clasifican como los mejores, el sistema de MMAS, ACS y RAS (Dorigo y Stutzle, 2004).

Para resolver un problema particular empleando OCH es importante seguir una serie de pasos que permitan encontrar una solución, estos son: modelar el problema en forma de árbol, tener un conjunto finito de posibles soluciones, asignar significado a los rastros de feromona, definir la información heurística del problema a tener en cuenta, escoger un tipo de OCH y fijar sus parámetros de configuración. En la figura 2.3 se presenta un resumen de estos pasos (Darquennes, 2005).



Figura 2.3. Pasos para analizar un problema con OCH.

De forma general, la OCH busca la solución a un problema en 3 pasos (Dorigo y Stutzle, 2004), estos se representan en el pseudocódigo de la figura 2.4.

```

procedimiento ACH
  Construir Soluciones
  Actualizar Feromonas
  Realizar Acciones Opcionales
Fin procedimiento
  
```

Figura 2.4. Pseudocódigo de un OCH.

Construir soluciones: proceso que gestiona la colonia de hormigas que se está moviendo entre los nodos del grafo del problema. Para realizar los movimientos las hormigas toman decisiones probabilísticas, usando los trayectos de feromona y la información heurística asociada y construyen incrementalmente las soluciones. Cuando una hormiga ha construido una solución o mientras la construye, evalúa la solución parcial que será usada por el procedimiento de actualización de feromona para decidir cuanta feromona utilizar.

Actualizar feromona: proceso que modifica los trayectos de feromona. Las hormigas depositan feromona en los nodos o en las conexiones que utilizan. Mediante la evaporación de feromona se disminuye la concentración de feromona con el paso del tiempo, lo cual constituye una forma de evitar el estancamiento del algoritmo en una solución equivocada. Entre mayor sea la cantidad de feromona que existe en un nodo o en una conexión, mayor será la probabilidad de que dicho nodo o conexión sea empleado por otras hormigas.

Realizar Acciones Opcionales: procedimientos empleados para realizar acciones centralizadas que requieren de un conocimiento global, que no pueden ser desarrolladas por las hormigas individualmente. Por ejemplo, la decisión de depositar cantidades adicionales de feromonas en algunas conexiones o nodos. Este procedimiento no tiene uno similar en el ambiente natural.

2.3.1. Aplicación de OCH

La OCH está siendo ampliamente estudiada y analizada en diferentes áreas del conocimiento, tiene características únicas, como la actualización de la feromona basada en la calidad de las soluciones o el uso de diferentes estrategias para construir soluciones, lo que permite realizar un procesamiento más eficiente en la búsqueda de una solución.

Las principales aplicaciones se han dado en diferentes áreas: Asignación Cuadrática, Secuenciación de Tareas, Enrutamiento Vehicular, Ordenación Secuencial, entre otras. En cada una de estas aplicaciones se han logrado buenos resultados de desempeño del algoritmo (Dorigo y Stutzle, 2004; Darquennes, 2005).

En comunicaciones inalámbricas, se ha empleado OCH para detectar usuarios en un ambiente multiusuario (Alonso y Cordon, 2004), obteniendo resultados satisfactorios. Este trabajo está enfocado en analizar la posibilidad de adaptar un algoritmo de detección de señal en un sistema MIMO 2x2 y 4x4, empleando dos variantes de los ACH.

Capítulo 3

Aplicación de la Metodología de Simulación

En este capítulo se presenta la adaptación de una Metodología de Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones (Astaiza, *et al.*, 2007) al objeto de estudio de esta tesis de maestría. La metodología está compuesta por una serie de fases que permiten el desarrollo de la simulación del sistema, entre estas: definición del sistema, análisis del sistema, formulación del modelo del sistema, selección del lenguaje, codificación del modelo, experimentación, validación del modelo y monitoreo y control. El desarrollo de estas fases se presenta a continuación.

3.1. Definición del Sistema

El sistema a implementar consiste en un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4, con canal invariante en el tiempo, conocimiento perfecto del canal, desvanecimiento plano, y esquema de modulación QPSK. Se trabaja el esquema de multiplexación VBLAST y se diseñan e implementan dos algoritmos basados en OCH, para la detección de los símbolos que llegan al receptor.

3.2. Análisis del Sistema

En esta fase se aplica la metaheurística OCH a la detección de señal en un sistema MIMO, para ello se siguen los pasos definidos para aplicar esta técnica a un problema específico (Dorigo y Stützle, 2004).

Un aspecto importante a definir en el sistema es el tipo de OCH a utilizar para el diseño del algoritmo de detección de señal, entre las posibilidades se tienen los algoritmos AS, ES, RAS, MMAS, ACS, ANTS y el HCF - ACO. Se escoge el algoritmo de colonias de hormigas básico AS, ya que a partir de este, con algunas modificaciones pueden generarse los otros tipos de OCH. También se escoge el algoritmo ACS, porque se ha encontrado que brinda buenos resultados ante problemas similares al de la detección de señal en sistemas MIMO, y está catalogado como uno de los mejores algoritmos de OCH (Dorigo y Stützle, 2004). En trabajos relacionados, no ha sido empleado el algoritmo ACS para la detección de señal en Sistemas MIMO.

A continuación se realiza el desarrollo de los pasos indicados por Dorigo (Dorigo y Stützle, 2004), para resolver un problema con OCH.

3.2.1. Definición del problema

El problema NP que se busca resolver es la detección de los símbolos complejos que fueron transmitidos por múltiples antenas, a partir de un conjunto de símbolos recibidos por múltiples antenas en el receptor de un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4 con modulación QPSK.

3.2.2. Representación del problema como un árbol

Para el sistema MIMO se modela el árbol del problema. El número de estados de la modulación es 4, se trabajan con 2 o 4 antenas en transmisión y en recepción.

Para representar el problema como un árbol se tienen en cuenta las siguientes características:

1. Dado que los símbolos que llegan al receptor son complejos, estos se descomponen en su parte real e imaginaria, los valores que pueden tomar los símbolos son $\{1 + j, 1 - j, -1 + j, -1 - j\}$, si se descomponen en la parte real e imaginaria $\{1, +1, 1, -1, -1, +1, -1, -1\}$, se aprecia que el conjunto de valores es $\{-1, +1\}$. Estos valores corresponden a los nodos del árbol, por lo tanto cada nodo tendrá dos hijos.
2. La matriz del canal de transmisión está compuesta por elementos complejos, para el tratamiento de la señal, estos se descomponen en su parte real e imaginaria, por lo tanto el tamaño de la matriz de canal es 4×4 para el sistema MIMO 2×2 y el tamaño de la matriz es de 8×8 para el sistema MIMO 4×4 .
3. El número de niveles del árbol es igual a dos veces el número de antenas del sistema MIMO, por la descomposición de los símbolos en su parte real e imaginaria.
4. Una hormiga puede moverse a cualquiera de los nodos del árbol.

En la figura 3.1 se presenta el árbol del problema para un sistema MIMO 2×2 QPSK, en este caso se tienen 5 niveles y cada nodo tiene dos hijos.

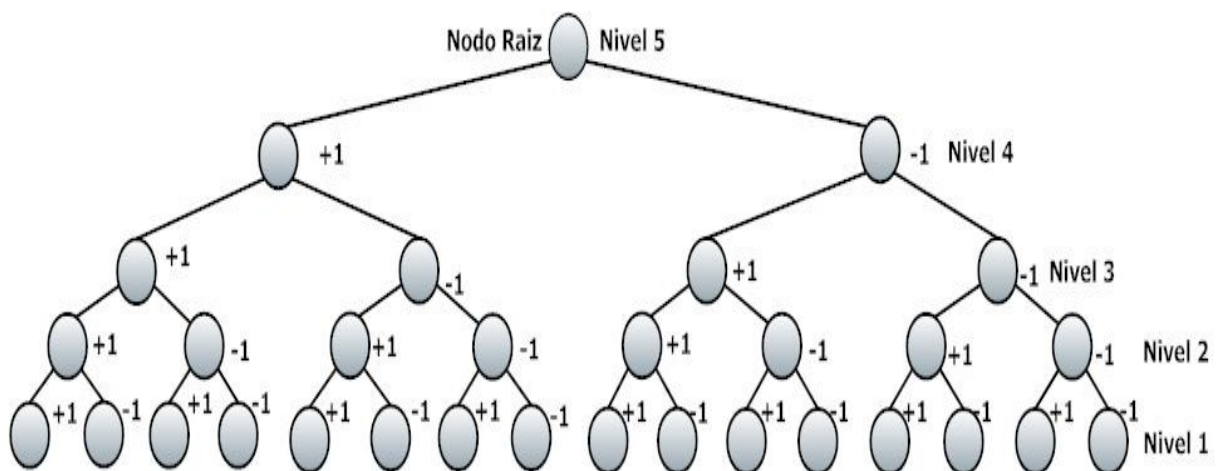


Figura 3.1. Árbol del problema de detección sistema MIMO 2×2 , QPSK.

Teniendo en cuenta que los nodos del árbol siempre tienen los mismos valores, la solución del problema en el modelo de simulación se simplifica, teniendo en cuenta que el proceso de búsqueda utilizado es diferente al empleado en el algoritmo ML o SD.

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente, la representación en árbol para el sistema MIMO 4x4 con modulación QPSK, el cual se presenta en la figura 3.2, el número de hijos de cada nodo se mantiene constante dado que se emplea la misma modulación, pero varía el número de niveles del árbol por la variación en el número de antenas del sistema MIMO. Como los símbolos se descomponen en su parte real e imaginaria, el número de niveles del árbol se incrementa a 8.

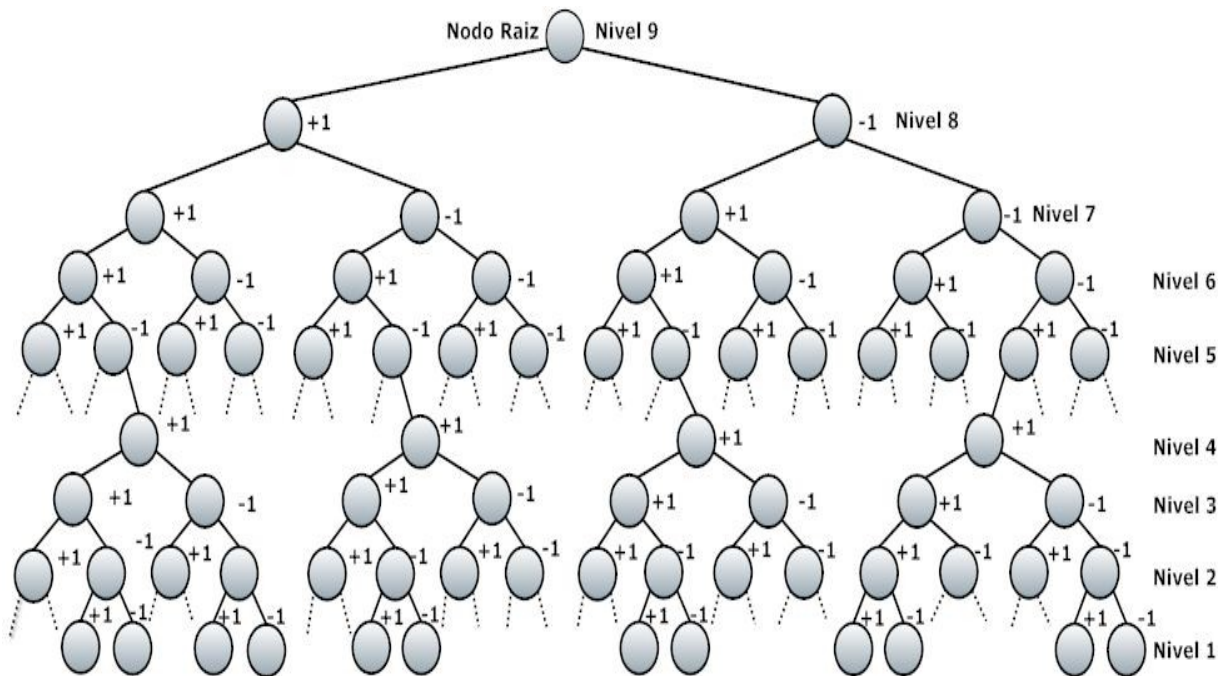


Figura 3.2. Árbol del problema de detección sistema MIMO 4x4, QPSK.

El árbol del problema para el sistema MIMO 4x4 tiene una mayor cantidad de niveles que el de la figura 3.1, la complejidad asociada al sistema 4x4 es mayor dado que es necesario evaluar la solución a través de una mayor cantidad de trayectos.

3.2.3. Restricciones del problema

Las hormigas solo pueden visitar una sola vez un nodo.

3.2.4. Información de los trayectos de feromona

Los trayectos de feromona representan la deseabilidad de un nodo de acuerdo a la ecuación 3.1

$$d_i(s^i) = \left| \hat{Y}_i - \sum_{j=i+1}^{M_t} R_{ij} S_j - R_{ii} S_i \right|. \quad (3.1)$$

La expresión (3.1) corresponde a la función de evaluación del ACH.

3.2.5. Inicialización del algoritmo

Para calcular la función de evaluación del algoritmo se realiza la descomposición QR de la matriz del canal H, posteriormente se explora el árbol del problema completamente, calculando todas las distancias d_{ij} entre los nodos del grafo y un símbolo a la entrada del receptor, empleando la ecuación 3.1. Estas distancias representan la diferencia entre el símbolo que llega al receptor y cada uno de los símbolos de la constelación.

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3.2)$$

Donde d_{ij} se calcula utilizando la ecuación 3.1

Es importante determinar el valor inicial de la constante asociada a la feromona τ y el número de hormigas que se utilizarán. El pseudocódigo empleado para realizar el cálculo de la función de evaluación, se presenta en la figura 3.3. M representa el número de niveles del árbol, y M_c el número de estados de la modulación.

```

% Ciclo por cada nivel del árbol
Para i=1 hasta M
% Ciclo por cada nodo de un nivel
    Para i = 1 hasta Mc
        % Se calcula la función de evaluación
        Calcular FuncionEvaluacion();
        % Se calculan las distancias
        Calcular Distancia();
    Fin
Fin
Fin

```

Figura 3.3. Pseudocódigo para el cálculo de las distancias en los Detectores ACH.

El primer ciclo representa la exploración por niveles del árbol, el segundo la búsqueda por los nodos de cada nivel. La función *Calcular FuncionEvaluacion* realiza el cálculo de la ecuación 3.1 y la función *CalcularDistancia* evalúa la ecuación 3.2. Este paso es común para los dos tipos de detectores. La construcción de la solución y la actualización de la feromona es diferente para cada detector y se presentan a continuación.

3.2.6. Detector AS

3.2.6.1. Construcción de la solución

Este algoritmo es una adaptación del AS para la detección de señal en un sistema MIMO. Para construir la solución las hormigas se mueven por el árbol, buscando el símbolo enviado. En cada nodo se determina el próximo movimiento, calculando la probabilidad de transición presentada en la ecuación 3.3.

$$\Delta\rho_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha n_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} n_{il}^\beta \tau_{il}^\alpha} & \text{si } j \text{ pertenece a } K \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde τ se ha iniciado en un valor específico en la fase anterior, este se actualiza en cada paso de la construcción, de trabajos experimentales $0 < \alpha < 1$, $2 < \beta < 5$ (Dorigo & Stützle, 2004). El pseudocódigo empleado para realizar la construcción de la solución, se presenta en la figura 3.4.

```

% Ciclo por cada hormiga
Para k = 1 hasta k
% Ciclo por cada nivel del árbol
  Para i= 1 hasta M
    % Ciclo por cada nodo de un nivel
    Para j= 1 hasta Mc
      %Calcula la probabilidad de transición de cada nodo
       $\rho_{ij}^k = \text{Calcular Probabilidad}()$ 

    Fin
  % Se comparan los valores de probabilidad de transición
  Para j = 1 hasta Mc
    Si  $P_{ij} > P_{i(j+1)}$ 
      % Se asigna al símbolo detectado en el nivel i,
      % el de menor probabilidad
      Sk = Si
      terminar
    Sino
      Sk = S(j+1)
  Fin
Fin
% Se actualiza la feromona
Actualizar feromona();
Fin
SimboloEnviado = DeterminarSimbolo().

```

Figura 3.4. Pseudocódigo para la construcción de la solución en el Detector AS

Para cada una de las hormigas se realiza la búsqueda por el árbol del problema. La construcción de la solución se realiza en dos pasos: inicialmente se calcula la probabilidad de transición en cada nodo del árbol, este valor se almacena en la matriz de probabilidades del problema, y será consultado posteriormente. La función calcularProbabilidad realiza las operaciones de la ecuación 3.3; en el segundo paso, se escoge hacia donde debe moverse la hormiga en cada paso de construcción, para esto se compara la probabilidad de transición de cada uno de los nodos hijos y se escoge el hijo de mayor probabilidad, su índice es almacenado en la ruta de la hormiga.

Posteriormente se realizan las actividades para actualizar la feromona y determinar el símbolo enviado inicialmente, mediante el análisis de la matriz de feromona. Aquellos trayectos con mayor cantidad de feromona constituyen la solución del algoritmo.

3.2.6.2. Actualización de la feromona

Una vez que las hormigas completan su recorrido, es necesario depositar feromona en aquellos trayectos que han sido visitados por las hormigas, y también evaporarla para facilitar la exploración de nuevas rutas. La actualización de la feromona se realiza de acuerdo a la ecuación 3.4:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{K=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.4)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{F(s)} & \text{si la hormiga } k \text{ usa el trayecto } (i, j) \text{ en su ruta} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (3.5)$$

$0 < \rho \leq 1$ constituye la constante de evaporación de la feromona

Donde ρ es la constante de evaporación de la feromona su valor inicial es 0.3 (calculado de forma experimental), $F(s)$ representa la función de evaluación del algoritmo, que determina la calidad de la solución, en el algoritmo original este representa el trayecto seguido por la hormiga, en este trabajo representa la función del detector de señal (ecuación 3.1). El pseudocódigo empleado para realizar la actualización de la feromona, se presenta en la figura 3.5.

```

% Funcion actualizar feromona
Lk = Calcular Ruta ()
Δτijk = Calcular Delta()

% Si (i,j) hace parte de la ruta de la hormiga
Si (i,j) pertenecen a Lk
τijn+1 = depositarFeromona()
Fin funcion

```

Figura 3.5. Pseudocódigo para la actualización de feromona en el Detector AS

La función Calcular Ruta determina los nodos por los cuales se ha movido la hormiga, los cuales se encuentran en una matriz de rutas del problema. La función CalcularDelta se encarga de evaluar la calidad de la solución, realizando las operaciones de la ecuación 3.5.

La función depositarFeromona recorre el árbol de acuerdo a la ruta que siguió la hormiga, y deposita feromona en los trayectos correspondientes a dicho recorrido. La actualización de la feromona se realiza de acuerdo a la ecuación 3.4.

3.2.7. Detector ACS

3.2.7.1. Construcción de la solución

En este paso las hormigas se mueven por el árbol, de acuerdo a una regla de transición proporcional pseudoaleatoria, que se presenta en la ecuación 3.6.

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in N_i^k} \{\tau_{il}[n_{il}]^\beta\}, & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{de otro modo} \end{cases}$$

(3.6)

Donde, q_0 es una constante en el rango de $[0,1]$, q es una variable aleatoria en el mismo rango. El pseudocódigo empleado para la construcción de la solución, se presenta en la figura 3.6.

```

% Ciclo por cada hormiga
Para k = 1 hasta k
% Ciclo por cada nivel del árbol
  Para i= 1 hasta M
    % Ciclo por cada nodo de un nivel
    Para j= 1 hasta  $M_c$ 
      %Calcula la probabilidad de transición de cada nodo
       $\rho_{ij}^k = \text{CalcularProbabilidadACS}()$ 

    Fin
     $P = \rho_{i1}^k$ 
    % Se comparan los valores de probabilidad de transición
    Para j = 1 hasta  $M_c$ 
      Si  $P_{ij} > P_{i(j+1)}$ 
        % Se asigna al símbolo detectado en el nivel i,
        % el de menor probabilidad
         $S_{ik} = S_j$ 
        terminar
      Sino
         $S_{ik} = S_{(i+1)}$ 
      Fin
    Fin
    % Se actualiza localmente la feromona
    ActualizarferomonaLocal();
  Fin
mejorHormiga= buscarMejorHormiga()
actualizarACS(mejorHormiga)
SimboloEnviado = DeterminarSimbolo()

```

Figura 3.6. Pseudocódigo para la construcción de la solución en el Detector ACS.

Como en el Detector AS, para todas las hormigas se explora el árbol del problema, calculando las probabilidades. En este caso se emplea la función calcular ProbabilidadACS, la cual realiza las operaciones de la ecuación 3.6. El valor de la probabilidad se almacena en la matriz de probabilidades de acuerdo al nivel del árbol y el índice del nodo.

Posteriormente, se escoge hacia donde debe moverse la hormiga de la misma forma que en el Detector AS. Cuando las hormigas pasan por un nodo depositan una mínima cantidad de feromona en el trayecto, una vez que todas las hormigas han terminado el recorrido por el árbol, la función buscarMejorHormiga determina cuál hormiga encontró la mejor solución, definida como la menor distancia entre el símbolo que llega y un símbolo de la constelación correspondiente a la modulación. La siguiente operación es la actualización de la feromona, la cual se explica a continuación.

Finalmente la función determinarSímbolo se encarga de analizar la matriz de feromonas e identificar el camino que tiene la mayor concentración de feromona. Los nodos correspondientes a dicha ruta representan la solución del algoritmo.

3.2.7.2. Actualización de la feromona

En ACS solo deposita feromona la hormiga de la mejor ruta encontrada hasta el momento R^{bs} . La actualización se realiza de acuerdo a la ecuación 3.7:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad \forall (i,j) \in R^{bs} \quad (3.7)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs} \quad (3.8)$$

El pseudocódigo empleado para realizar la actualización de la feromona, se presenta en la figura 3.7.

```

% Funcion actualizar ACS (mejorHormiga)
  Lk = determinarRuta(mejor Hormiga)
  Δτijk = calcularDelta(mejorHormiga)

% Si (i,j) hace parte de la ruta de la mejor hormiga
  Si (i,j) pertenecen a Lk
    τijn+1 = depositarFeromona()
  Fin funcion

```

Figura 3.7. Pseudocódigo para actualización de feromona en el Detector ACS.

La función determinarRuta determina los nodos y trayectos por los cuales se movió la mejor hormiga. La función calcular Delta evalúa la calidad de la solución, realizando las operaciones de la ecuación 3.6.

La función depositarFeromona actualiza la feromona solamente en las conexiones que hacen parte de la ruta de la mejor hormiga, esto se realiza de acuerdo a la ecuación 3.7.

3.2.8. Análisis de resultados

En esta parte se analizan los resultados del detector de señal, que deben corresponder con el vector de símbolos enviado desde el transmisor, para ello se realiza el cálculo de los valores de la BER en función de SNR, este análisis se desarrolla en el capítulo 4.

3.3. Formulación del Modelo del Sistema

Es necesario implementar un código lógico-matemático que defina y respalde de forma exacta todas las interacciones entre las variables. El modelo general del sistema se presenta en la figura 3.8.

El Generador de datos proporciona la información a transmitir, una secuencia aleatoria de bits. Para el Modulador se utiliza QPSK y en el multiplexor espacial se emplea en esquema VBLAST.

En el arreglo de antenas se emplean sistemas 2x2 y 4x4. El canal de radio es AWGN, invariante en el tiempo, con desvanecimiento plano en frecuencia y se asume conocimiento perfecto del canal en el receptor.

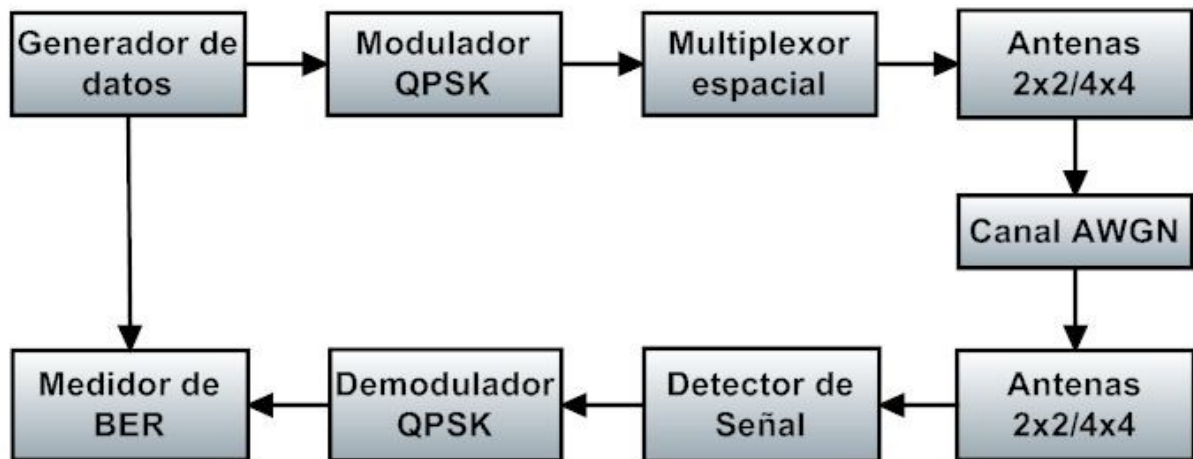


Figura 3.8. Diagrama en bloques del sistema MIMO.

En el receptor se maneja un arreglo de antenas 2x2 y 4x4, seguidos del bloque del detector de la señal, donde se encuentran el Detector AS y el Detector ACS. Posteriormente la señal se demodula. En el destino se compara con la señal generada inicialmente y se realiza la medición de la BER del sistema.

En la figura 3.9 se presenta el diagrama de flujo de la simulación del sistema MIMO.

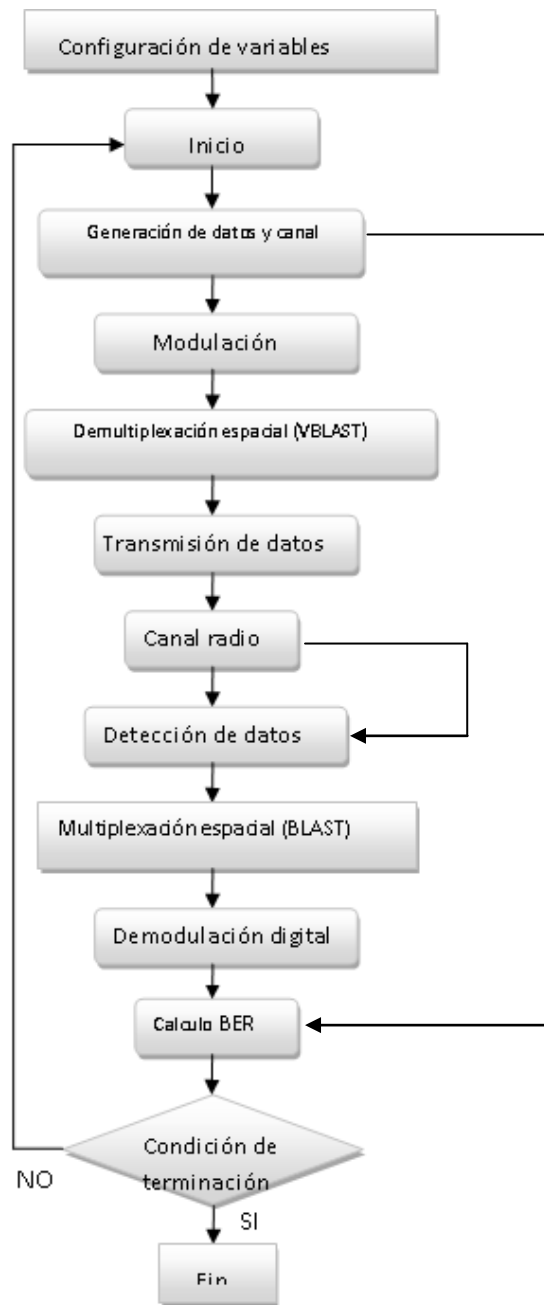


Figura 3.9. Simulación del Sistema MIMO.

En la figura 3.10 se presenta el diagrama de flujo del Detector AS, cada una de las hormigas de la colonia realizan la misma secuencia del diagrama.

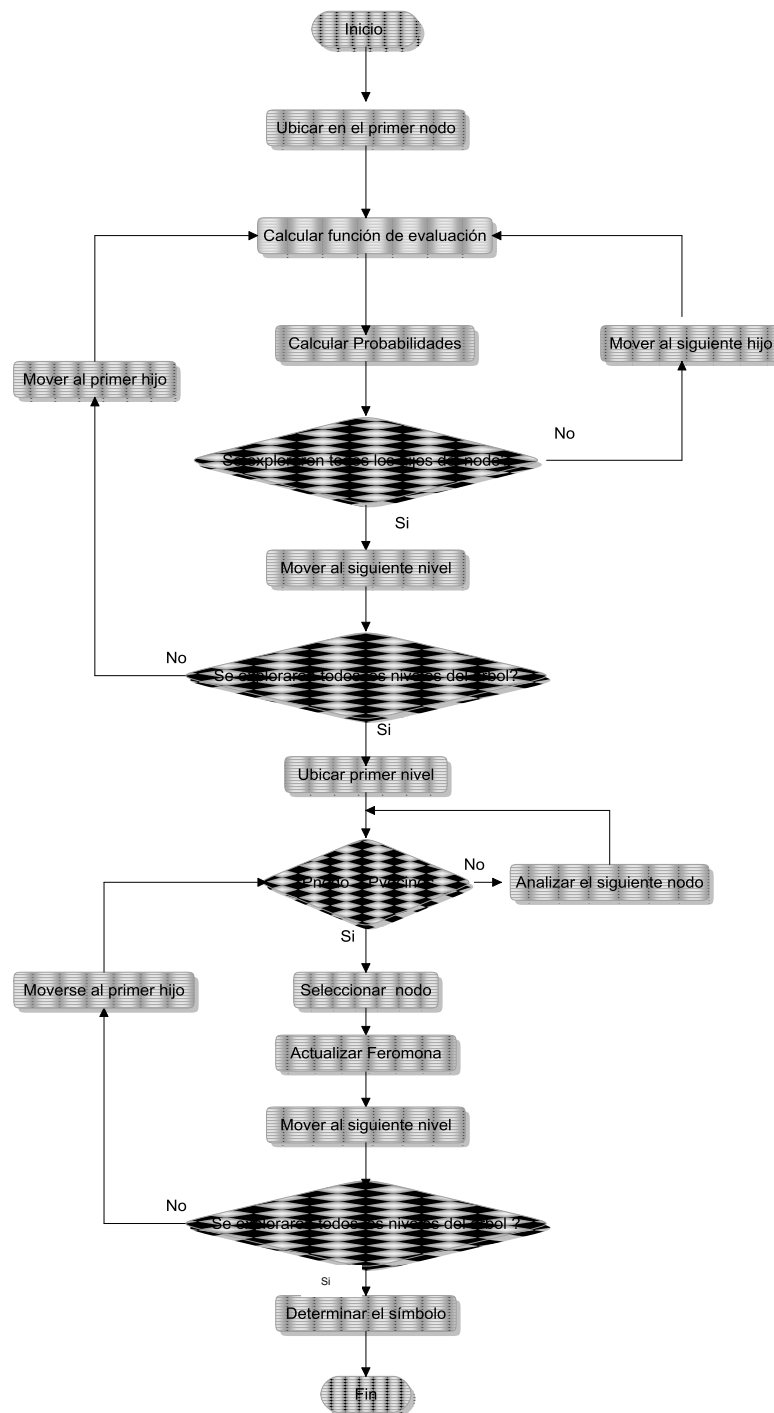


Figura 3.10. Diagrama de flujo del Detector AS.

En la figura 3.10 se presentan las actividades que realiza cada una de las hormigas del Detector AS. Es importante resaltar que cada una de las hormigas realiza actualización de feromona. En cambio en el Detector ACS, solamente la mejor

hormiga actualiza la feromona. El diagrama de flujo correspondiente al Detector ACS se presenta en la figura 3.11.

En la figura 3.11 se muestra que cada hormiga de la colonia realiza una actualización local de feromona, pero que solo al final del recorrido de todas las hormigas se escoge la mejor hormiga y solo esta puede realizar los procesos de actualización de feromona del Sistema de Colonias de Hormigas. Finalmente se analizan todos los trayectos y aquel que tiene los mayores valores de feromona constituye la solución del algoritmo.

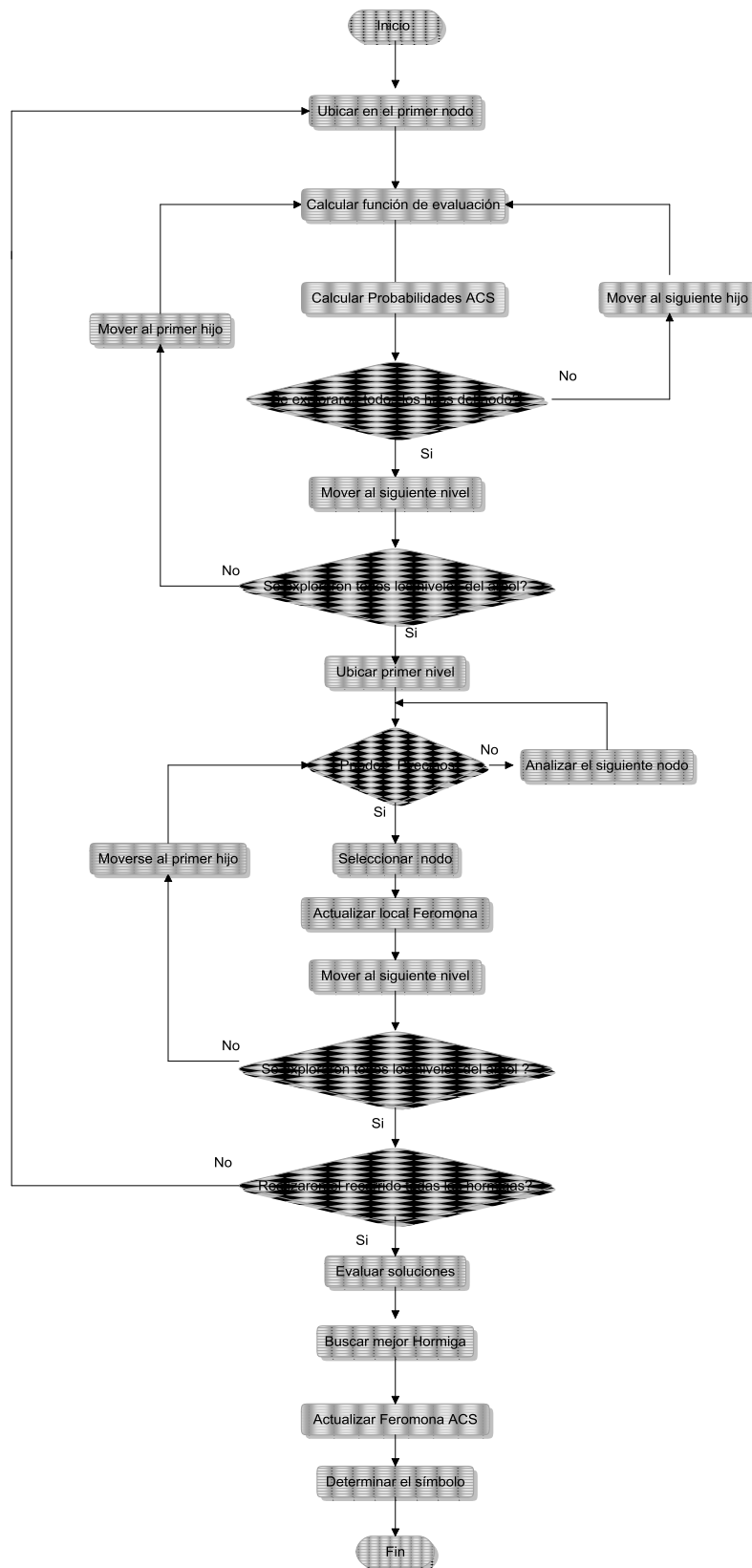


Figura 3.11. Diagrama de flujo del Detector ACS

3.4. Selección del Lenguaje

Para la selección de la herramienta de simulación se analizaron diferentes alternativas que permiten simular el comportamiento a nivel físico de sistemas MIMO. En el mercado existen diversas herramientas de simulación, pero la mayoría necesitan licencia. Entre las herramientas de simulación que se encontraron se pueden nombrar, MATLAB® 7.9 (R2009b), LabVIEW 7.0, NCTUns 3.0 y SCILAB 5.1.

Se eligió Matlab® dada su importancia a nivel de investigaciones mundiales, es una herramienta que ofrece resultados validos porque está soportada sobre una fuerte base matemática y es ampliamente aceptada en el ámbito de la investigación.

3.5. Codificación del Modelo

El modelo se codificó empleando Matlab®. Se implementaron diferentes funciones que permiten analizar el sistema MIMO 2x2 y 4x4 con los algoritmos de detección diseñados. El sistema fue codificado de acuerdo al mostrado en la figura 3.12

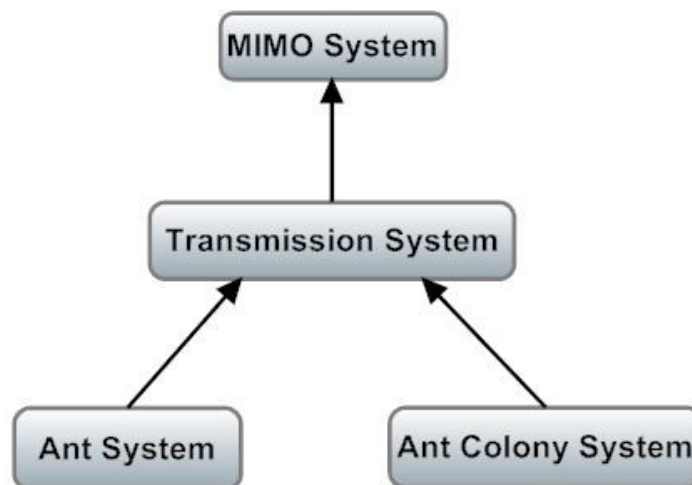


Figura 3.12. Codificación del modelo del Sistema MIMO.

La función principal es MIMO System, en la cual se definen las principales características del sistema de comunicación, tales como número de tramas, bits y relación señal a ruido. Esta función utiliza la función Transmission System la cual se encarga de la generación de bits, los procesos asociados a la transmisión de información por el canal de radio y la detección de la señal, específicamente este proceso utiliza la función AntSystem o Ant Colony System, dependiendo del algoritmo de detección analizado.

Para mayor detalle del sistema implementado en Matlab® remitase al Apéndice B.

3.6. Experimentación

En el diseño de experimentos, se tienen en cuenta las alternativas que pueden ser variables de entrada, como los bits a transmitir, el tipo de detector, entre los cuales están el Detector AS y el Detector ACS, el arreglo de antenas en transmisión y recepción (2x2 y 4x4). Las pruebas realizadas se presentan en el capítulo cuatro.

3.7. Validación del Modelo

Consiste en realizar comparaciones entre los resultados del modelo y los resultados de otros algoritmos. Esta fase se realiza para determinar si un modelo tiene la suficiente habilidad para ser representado en la realidad. Los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas se presentan en el capítulo cuatro.

3.8. Monitoreo y Control

La simulación desarrollada puede ser modificada, para realizar variaciones a los algoritmos de detección diseñados o al sistema MIMO, sin embargo ello requiere un análisis detallado del sistema y del código implementado.

Capítulo 4

Experimentación

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas a los algoritmos implementados, inicialmente se analiza el Detector AS en el sistema MIMO 2x2 y 4x4, variando diferentes parámetros de configuración. Posteriormente se realiza el análisis del Detector ACS en el sistema MIMO 2x2 y 4x4, donde se considera un mayor número de parámetros para su configuración. Finalmente se analiza comparativamente el desempeño de los detectores AS, ACS, ML, SD y SE.

Las simulaciones permiten analizar el desempeño de los detectores en el sistema, mediante el cálculo de la BER y requieren como parámetro de entrada la relación Señal a Ruido (SNR) por bit, para una condición de canal determinada y un esquema de modulación, considerando diferentes configuraciones del sistema de antenas. Las simulaciones se realizaron utilizando Matlab y fueron repetidas un número elevado de veces para obtener resultados validos estadísticamente.

Para las simulaciones se considera ruido AWGN con media cero y varianza σ^2 , donde $\sigma^2 = \frac{E_s}{SNR}$ y $\sigma^2 = N_0$, $SNR = \frac{E_s}{N_0}$,. La energía de símbolo es igual al número de antenas de transmisión del sistema $E_s = N_T$, el canal está normalizado para tener energía unitaria, y se transmiten 2^{14} bits en cada iteración de los algoritmos.

Los detectores diseñados no brindan resultados constantes, aproximadamente de 100 realizaciones del algoritmo, se obtienen 80 realizaciones con buen desempeño y 20 realizaciones con resultados variables y no coherentes como el incremento de la BER a medida que se incrementa la SNR, cuando se emplea el detector ACS. Cuando se emplea el detector AS, en 90 realizaciones se obtienen resultados satisfactorios y en 10 realizaciones se encuentran resultados no coherentes.

4.1. Algoritmo de Detección Basado en AS (Detector AS)

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros de configuración del Detector AS, con los cuales se obtuvieron buenos resultados y el valor con el cual se alcanzó el mejor desempeño de acuerdo a los resultados de comparaciones realizadas posteriormente. Las pruebas se realizaron para los sistemas MIMO 2x2 y 4x4. Los rangos de los parámetros se eligieron de acuerdo a lo recomendado por el creador de OCH (Dorigo y Stützle, 2004).

Tabla 4.1. Parámetros del Detector AS.

Parámetro	Valores	Mejor Valor
Número de hormigas	5, 10, 15, 20, 25	20
Valor inicial de feromona (ρ_0)	0.01, 0.03, 0.05	0.01
Factor de evaporación (ρ)	0.1, 0.2, 0.3	0.3
Constante α	0.3, 0.5, 0.8	0.5
Constante β	2	2
τ inicial	0.01	0.01

En las pruebas realizadas se encontró que los únicos valores validos β y τ inicial son 2 y 0.01 respectivamente.

4.1.1. Sistema MIMO 2x2

A continuación se presenta el análisis de la variación de los parámetros de configuración del Detector AS.

4.1.1.1. Variación del número de hormigas

En la figura 4.1 se presentan las gráficas de desempeño del Detector AS variando el número de hormigas, considerando $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$.

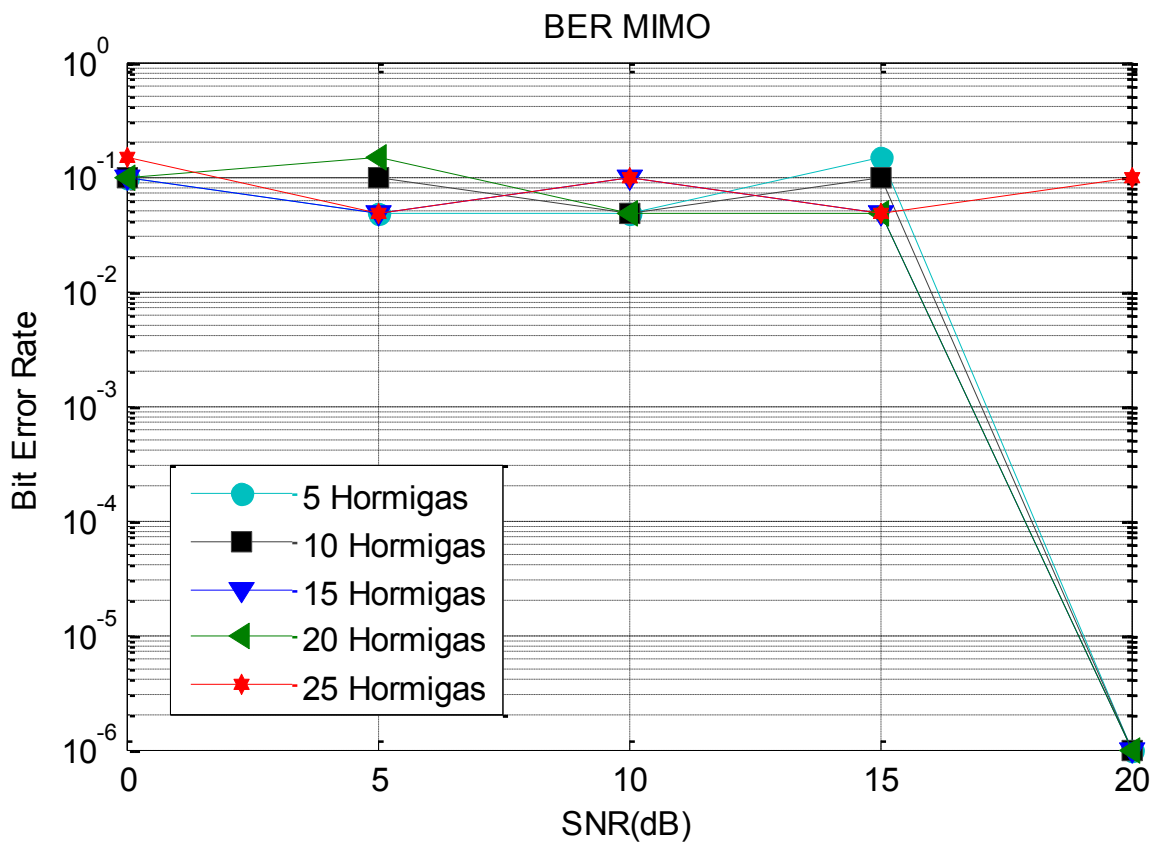


Figura 4.1. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 2x2.

El algoritmo presenta un comportamiento similar para el caso de 5,10,15 y 20 hormigas, sin embargo para 25 hormigas la BER se mantiene alrededor de 10^{-1} y no disminuye a medida que se incrementa la SNR. Con 5 hormigas entre 10 y 15 dB de

SNR, la BER se incrementa a medida que aumenta SNR. Con 20 hormigas, después de 8 dB de SNR se logran los valores más bajos de BER entre las curvas.

4.1.1.2. Variación de α

Para analizar las variaciones de α se consideran los valores de 0.3, 0.5 y 0.8, en la figura 4.2 se presentan los resultados del desempeño del Detector AS, los parámetros se fijan en 20 hormigas, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$.

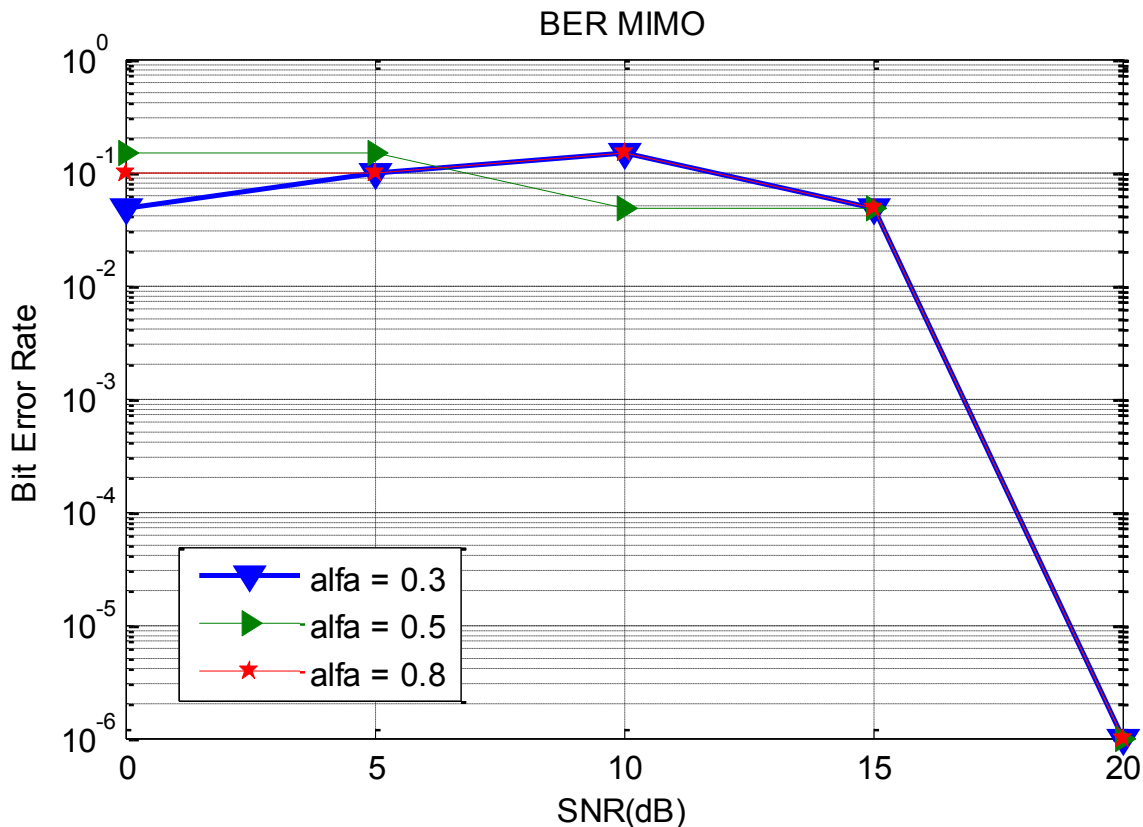


Figura 4.2. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando α en un sistema MIMO 2x2.

La variación de este parámetro afecta el desempeño del algoritmo para valores de SNR entre 0 y 15 dB, donde se observa que cuando $\alpha=0.3$ y $\alpha=0.8$, a medida que crece la SNR también se incrementa la BER del sistema, esto no constituye un comportamiento adecuado; en cambio cuando $\alpha=0.5$, el incremento en la SNR origina una disminución de la BER. Para una SNR mayor a 15dB el comportamiento es el mismo para los valores de α considerados.

4.1.1.3. Variación de Factor de Evaporación

Para analizar el efecto de la variación del Factor de Evaporación (ρ) se consideran diferentes valores. La figura 4.3 presenta las graficas obtenidas. Los parámetros de configuración son 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$ y $\tau=0.01$. Entre menor sea el valor del Factor de Evaporación se obtienen valores más altos de BER en el sistema. Para $\rho=0.1$, cuando la SNR se encuentra entre 0dB y 5dB, la BER disminuye hasta 5×10^{-2} , y se mantiene en este valor hasta 10 dB de SNR, pero entre 10 dB y 15 dB de SNR la BER se incrementa de acuerdo al aumento en la SNR, este no es un comportamiento deseado, por lo tanto este valor no se considera para la configuración. Con $\rho=0.2$, también se presenta un leve incremento en la BER para el rango de 0 a 10 dB de SNR. Solamente en la curva correspondiente a $\rho=0.3$, disminuye el valor de la BER a medida que se incrementa la SNR. Sin embargo para una SNR mayor a 15dB, los valores de la BER disminuyen rápidamente y su comportamiento es aproximadamente igual.

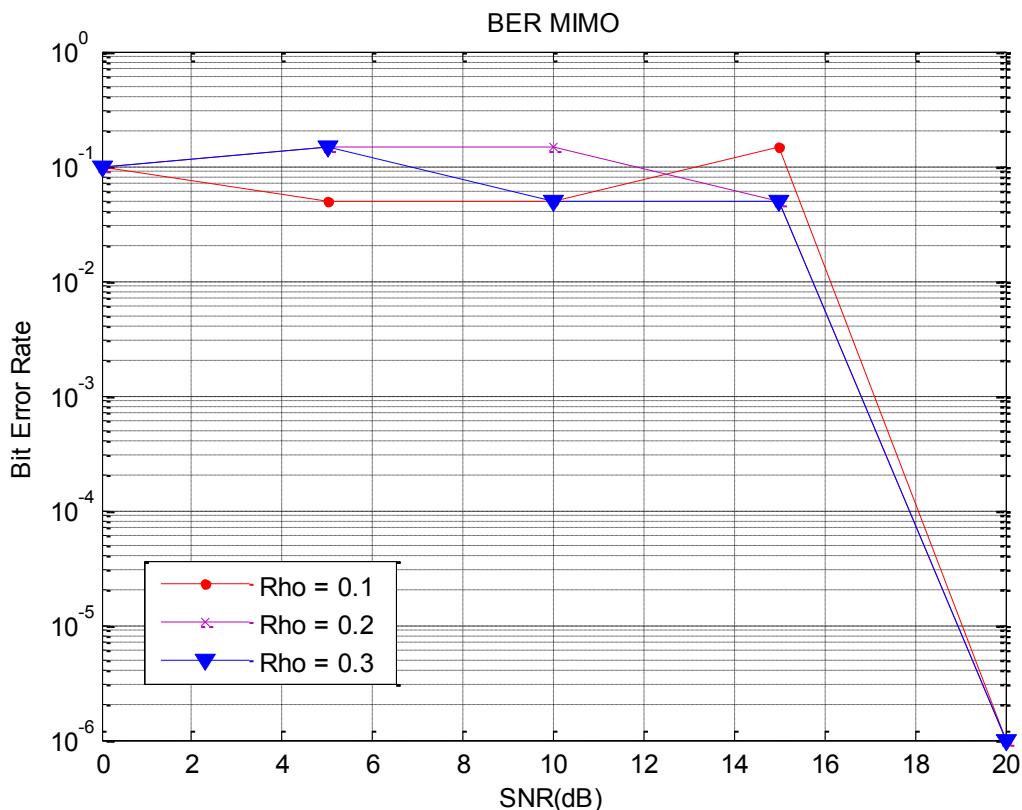


Figura 4.3. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 2x2.

4.1.1.4. Elección de parámetros de configuración

De acuerdo a los análisis realizados se escoge la configuración de los parámetros del detector AS para el sistema MIMO 2x2 así: 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$. En la figura 4.4 se presentan los resultados del Detector AS, empleando esta configuración.

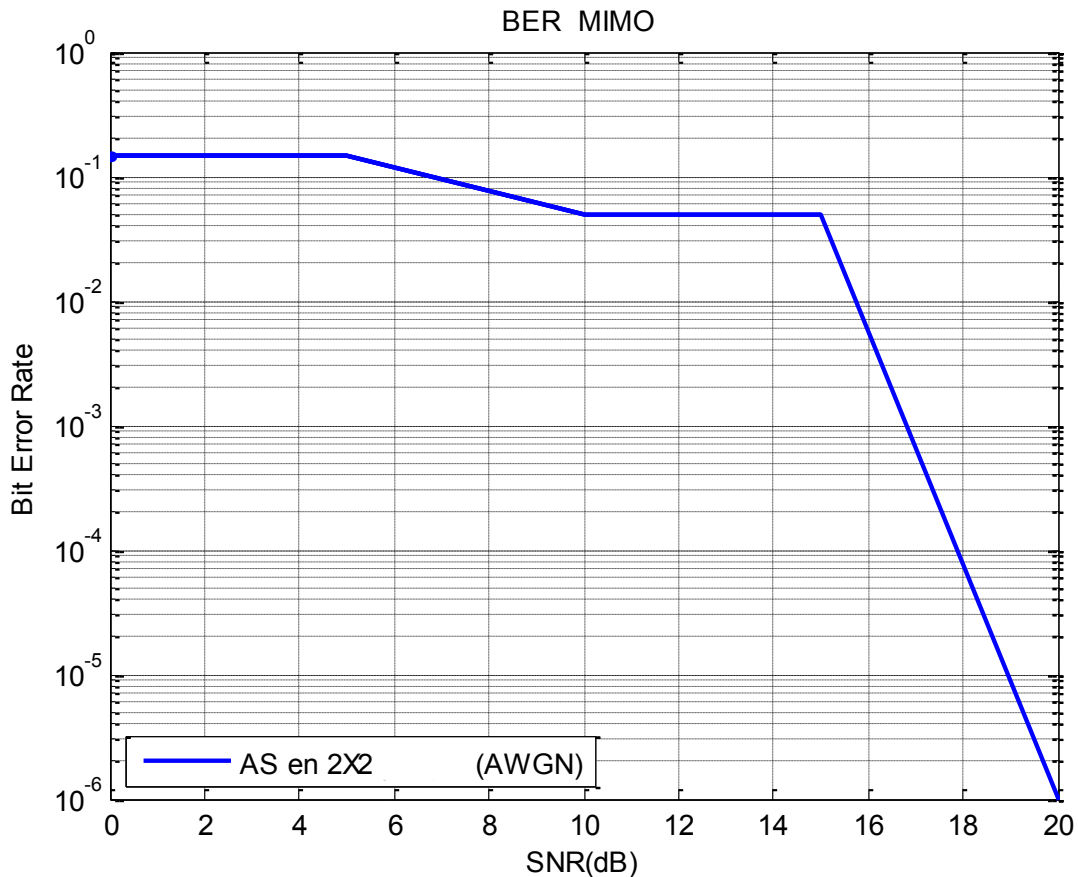


Figura 4.4. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el detector AS en un sistema MIMO 2x2.

En la figura 4.4 se observa que el sistema MIMO 2x2 tiene una BER de 1.5×10^{-1} para valores de SNR entre 0 dB y 5 dB, para valores de SNR entre 5 dB y 10 dB, la BER disminuye a medida que se incrementa la SNR y alcanza un valor de 5×10^{-2} , el cual se mantiene hasta una SNR igual a 15 dB. Después de este valor la pendiente de la curva se incrementa y rápidamente alcanza una BER de 10^{-6} para una SNR igual a 20 dB. Según la figura 4.4, el algoritmo presenta un mejor desempeño para valores

de SNR superiores a 15dB, porque para valores menores se presenta una disminución muy leve de la BER con respecto al incremento de la SNR.

4.1.2. Sistema MIMO 4x4

Se presentan los resultados del proceso de configuración de variables del detector AS en el sistema MIMO 4x4.

4.1.2.1. Variación del número de hormigas

En la figura 4.5 se presentan las gráficas correspondientes a la variación del número de hormigas, considerando $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$.

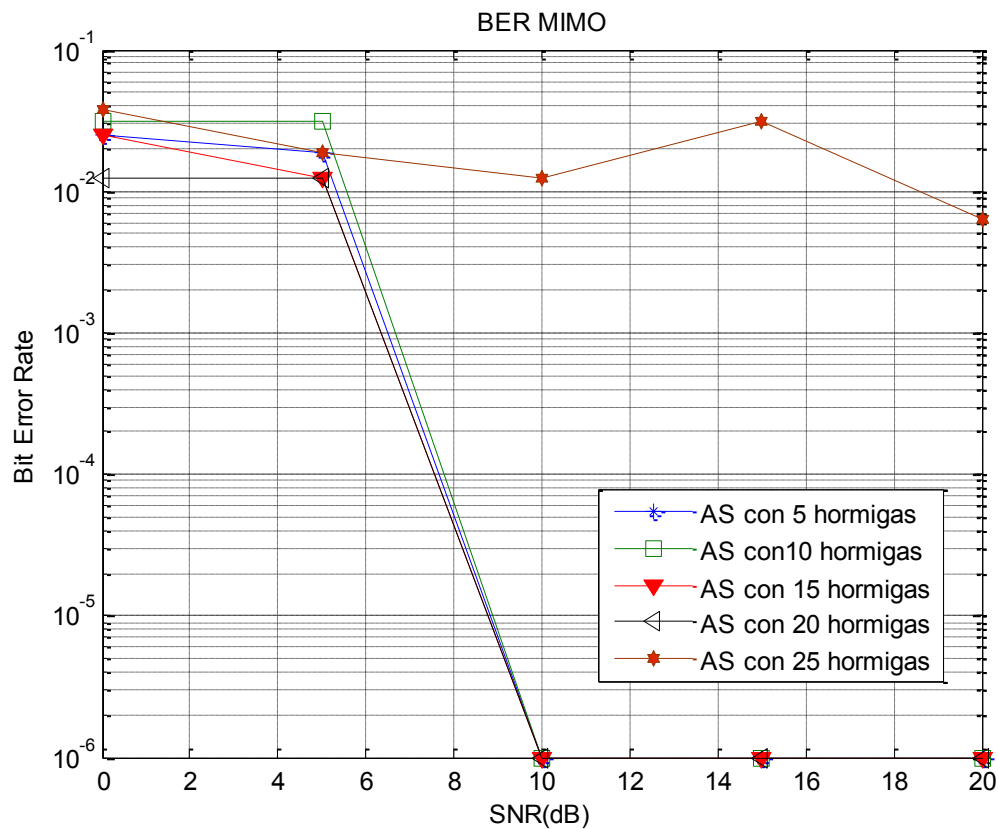


Figura 4.5. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 4x4.

Cuando se incrementa el número de hormigas de 5 a 20 el desempeño del sistema mejora para SNR entre 0 dB y 8 dB, en cambio con 25 hormigas la BER no disminuye a medida que se incrementa la SNR, sino que se mantiene alrededor de 10^{-2} . Para valores de SNR entre 0 dB y 8 dB el detector presenta el mejor desempeño con 20 hormigas y el peor con 25 hormigas. En este rango, las curvas de 5, 10, 15 y 20 hormigas se comportan de la misma forma, por lo tanto el detector presenta el mismo comportamiento sin importar la cantidad de hormigas que se utilicen.

4.1.2.2. Variación de α

En la figura 4.6 se presentan las curvas de desempeño del Detector AS variando la constante α . Los parámetros se fijan en 20 hormigas, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$. Se obtienen los menores valores de BER con $\alpha=0.5$ para todos los valores de SNR, el desempeño con $\alpha=0.3$ y $\alpha=0.8$ es muy similar para los diferentes valores de SNR.

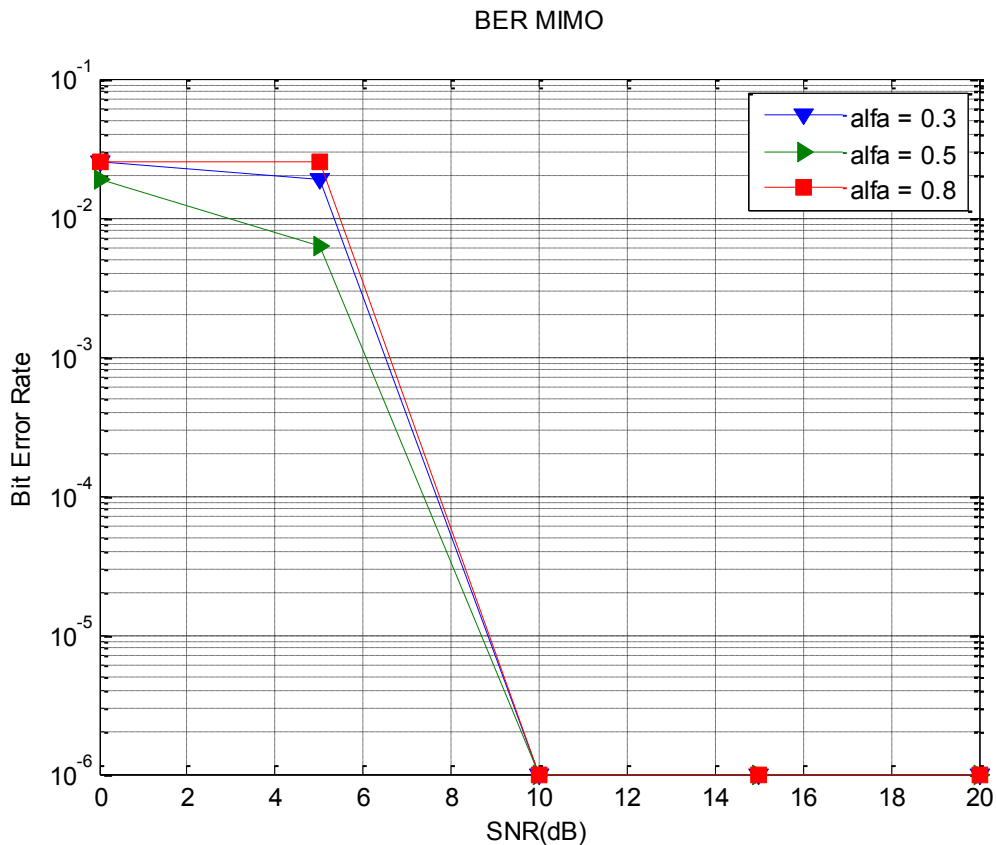


Figura 4.6. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando α en un sistema MIMO 4x4.

4.1.2.3. Variación del Factor de Evaporación

En la figura 4.7 se presentan las curvas correspondientes al desempeño del Detector ACS para diferentes valores del Factor de Evaporación. Los parámetros de configuración son 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$ y $\tau=0.01$. El desempeño mejora a medida que se incrementa el valor de ρ cuando la SNR varía entre 0dB y 8dB, el incremento en este factor representa mayor capacidad del algoritmo para olvidar una ruta seguida por las hormigas. Para SNR mayor a 8 dB el comportamiento del detector es aproximadamente el mismo para todos los valores de α .

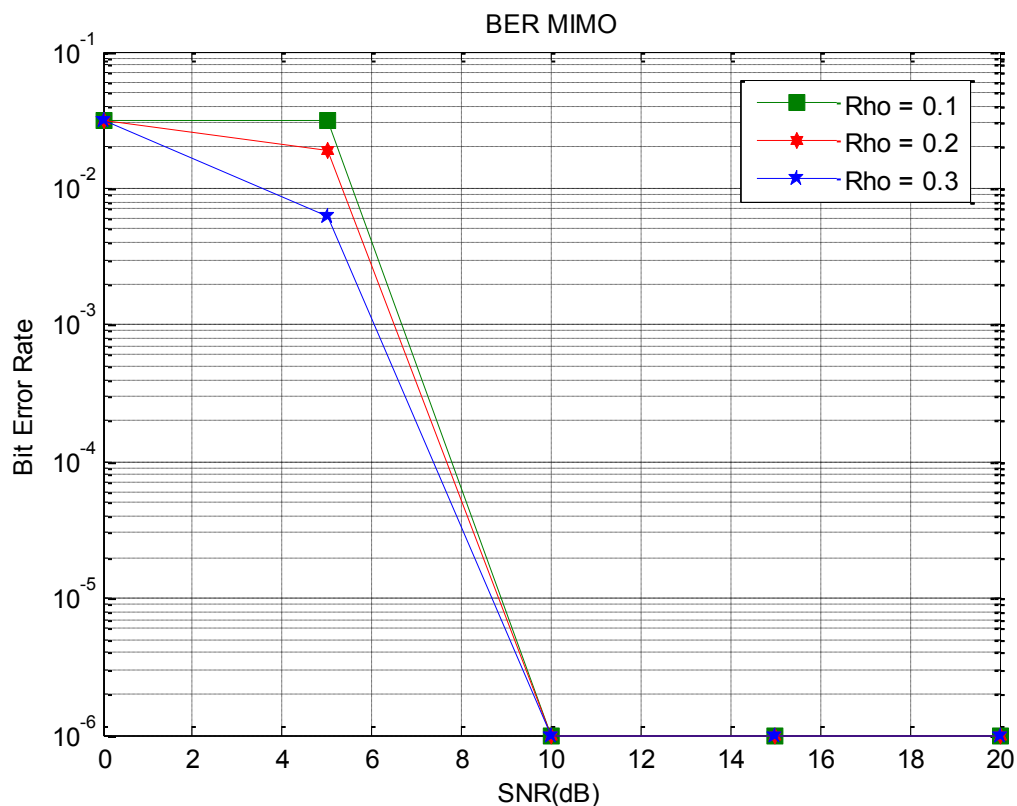


Figura 4.7. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector AS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 4x4.

4.1.2.4. Elección de Parámetros de Configuración

De acuerdo a los resultados obtenidos se configura el Detector AS para el sistema MIMO 4x4 con los siguientes parámetros: 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$. La figura 4.8 muestra los resultados de desempeño empleando esta configuración.

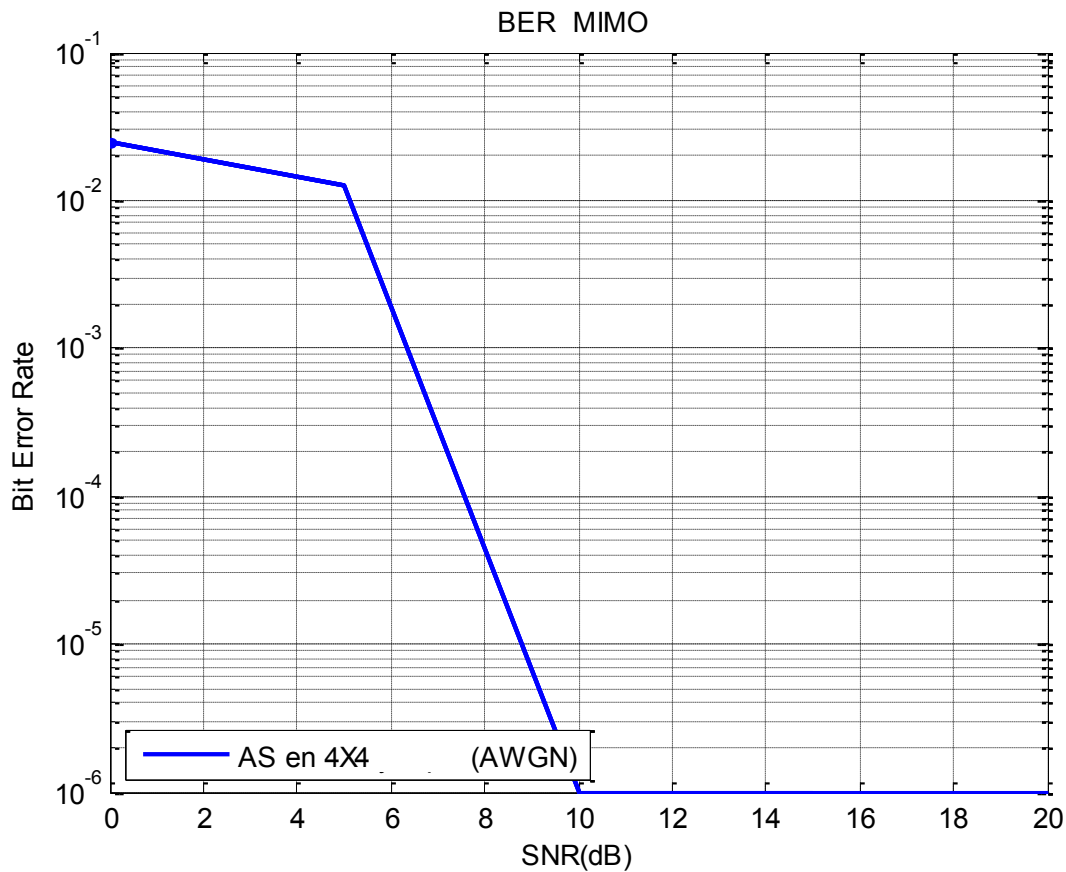


Figura 4.8. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el detector AS en un sistema MIMO 4x4.

En la figura 4.8 se observa que para valores de SNR entre 0 dB y 5 dB, la BER varía de 2.5×10^{-2} a 1.2×10^{-2} . A partir de 5 dB de SNR, la BER decrece rápidamente hasta llegar a 10^{-6} en 10 dB de SNR. Este detector tiene mejor desempeño en el sistema 4x4 comparado con el sistema 2x2, dado que necesita menores valores de SNR para alcanzar los mismos valores de BER.

4.2. Algoritmo de Detección Basado en ACS (Detector ACS)

En la tabla 4.2 se presentan los parámetros con los cuales se logró un desempeño cercano al detector ML y SD mediante el uso del Detector ACS. El mejor valor corresponde a la configuración con la cual se alcanzó se lograron los mejores resultados.

Tabla 4.2. Parámetros del Detector ACS.

Parámetro	Valores	Mejor valor
Número de hormigas	5, 10, 15, 20, 25	20
Valor inicial de feromona (ρ_0)	0.01, 0.03, 0.05	0.01
Factor de evaporación (ρ)	0.3	0.3
Constante α	0.3, 0.5	0.5
Constante β	2	2
τ inicial	0.01	0.01
Q	Entre 0 y 1	variable
q_0	0.5, 0.6, 0.8	0.6
Constante Zi ξ	0.01, 0.02	0.01
Constante t_0	0.01, 0.02	0.01

Los parámetros q , q_0 , ξ , t_0 son necesarios para la actualización local de feromona del algoritmo ACS, su descripción se encuentra en el Apéndice A. Para los parámetros β y τ inicial, solamente con los valores de la tabla se obtuvieron buenos resultados.

4.2.1. Sistema MIMO 2x2

A continuación se presenta el efecto de la variación de los parámetros de configuración del Detector ACS, en el desempeño del mismo.

4.2.1.1. Variación del número de hormigas

En la figura 4.9 se presentan las curvas correspondientes al desempeño del Detector ACS, con diferente número de hormigas, considerando $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$.

Con 25 hormigas el Detector ACS se mantiene alrededor de una BER de 10^{-2} , ante el incremento de la SNR; a medida que se incrementa el número de hormigas hasta 20, se obtienen menores valores de BER. Para valores de SNR entre 0 y 15dB, se observa mayor diferencia en el comportamiento de las curvas, obteniéndose los valores más altos de BER para 25 hormigas, seguido de 5 hormigas.

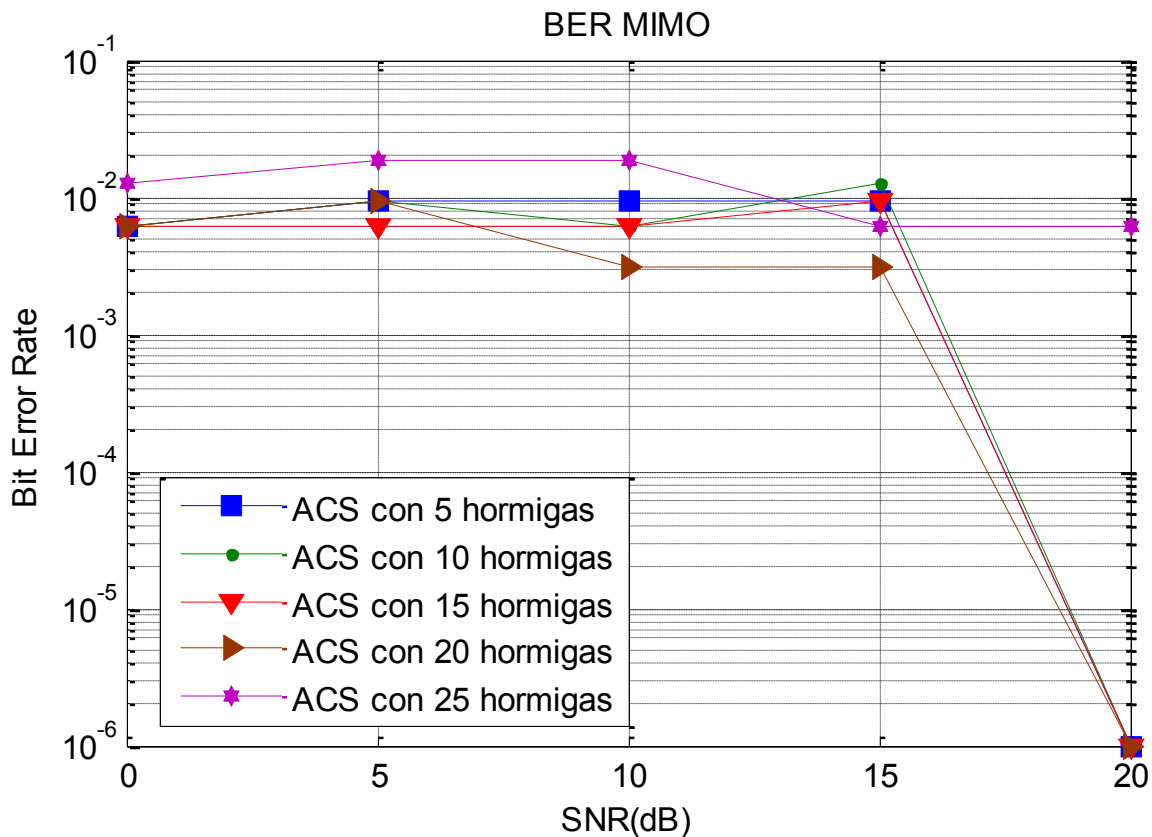


Figura 4.9. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 2x2.

Para el caso de 20 hormigas inicialmente la BER está por encima del valor alcanzado con 15 hormigas, pero cuando la SNR llega a 7 dB, la BER resultante es la menor del sistema. Para valores de SNR mayores a 15 dB, las curvas se comportan aproximadamente igual.

4.2.1.2. Variación de α

En la figura 4.10 se observa el efecto de la variación de α en el desempeño del Detector ACS, los demás parámetros se fijan en 20 hormigas, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$.

Con $\alpha=0.8$ se obtienen los valores más altos de la BER entre 3×10^{-6} y 10^{-2} , para una SNR mayor a 15dB las curvas se comportan de forma similar y alcanzan una BER de 10^{-6} en 20 dB. El comportamiento de $\alpha=0.3$ y $\alpha=0.5$, es muy similar, sin embargo cuando $\alpha=0.5$ la curva decrece a medida que se incrementa la SNR.

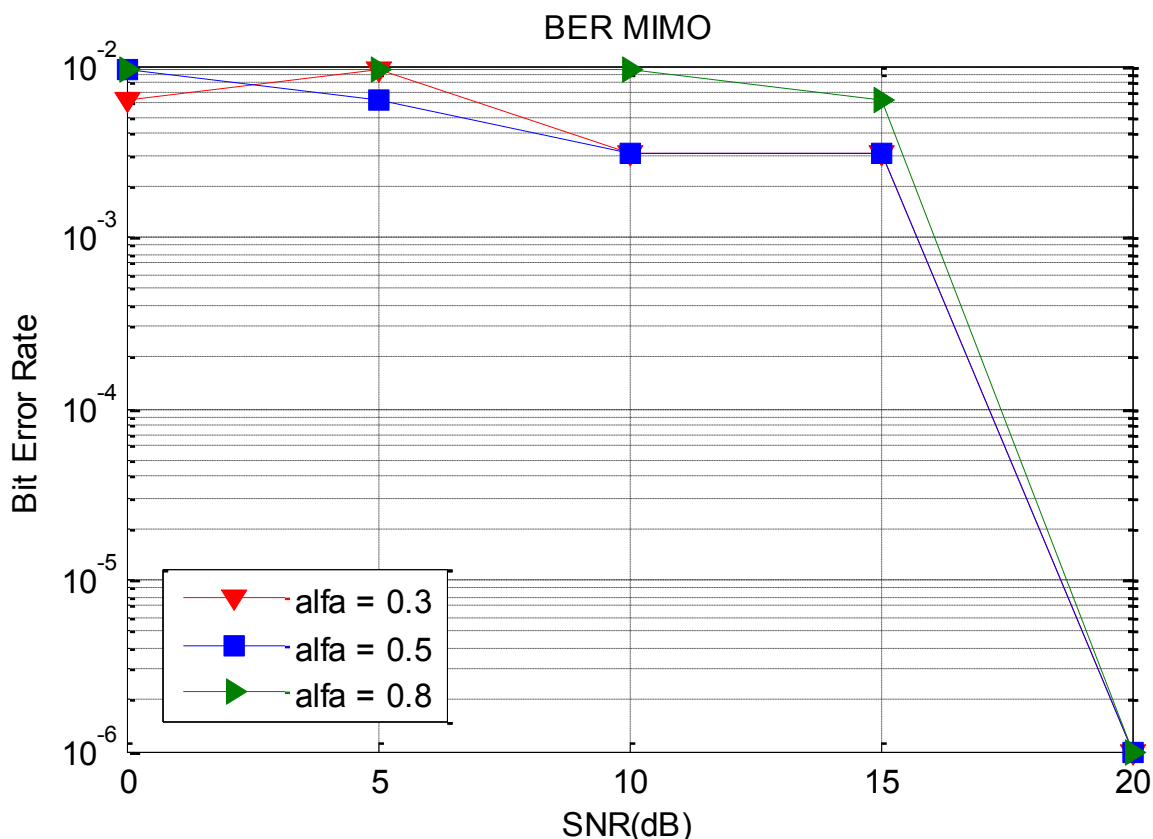


Figura 4.10. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando α en un sistema MIMO 2x2.

4.2.1.3. Variación del Factor de Evaporación

Solo se lograron buenos resultados en el desempeño del detector para $\rho=0.3$, considerando $\rho=0.1$, $\rho=0.2$ y $\rho=0.3$. Los parámetros de configuración son 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$ y $\tau=0.01$.

4.2.1.4. Variación de los parámetros adicionales

Se realizaron múltiples pruebas para determinar el efecto de la variación de los parámetros τ inicial, q , q_0 , ξ y t_0 . Se determinaron los rangos de variación, y se establecieron las mínimas diferencias en el desempeño, por lo tanto se consideran los valores más bajos, dado que presentan los menores valores de BER ante la variación de la SNR.

4.2.1.5. Elección de los parámetros de configuración

Del análisis realizado anteriormente se establecen los parámetros de configuración del Detector ACS como: 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.03$, $\tau=0.01$, $q_0=0.6$, $t_0=0.01$ y $\xi=0.01$. En la figura 4.11 se presentan los resultados del desempeño del Detector ACS, con los parámetros de configuración elegidos.

De acuerdo a la figura 4.11 el Detector ACS tiene una BER de 10^{-2} para una SNR de 0 dB, con el incremento de la SNR hasta 10 dB, decrece la BER hasta 3×10^{-3} . A pesar de que la SNR aumenta hasta 15 dB, la BER del sistema permanece en el mismo valor y para SNR mayor a 15 dB, la BER se reduce considerablemente alcanzando un valor de 10^{-6} con 20 dB de SNR. Al igual que el Detector AS, el Detector ACS trabaja eficientemente para valores de SNR superiores a 15dB.

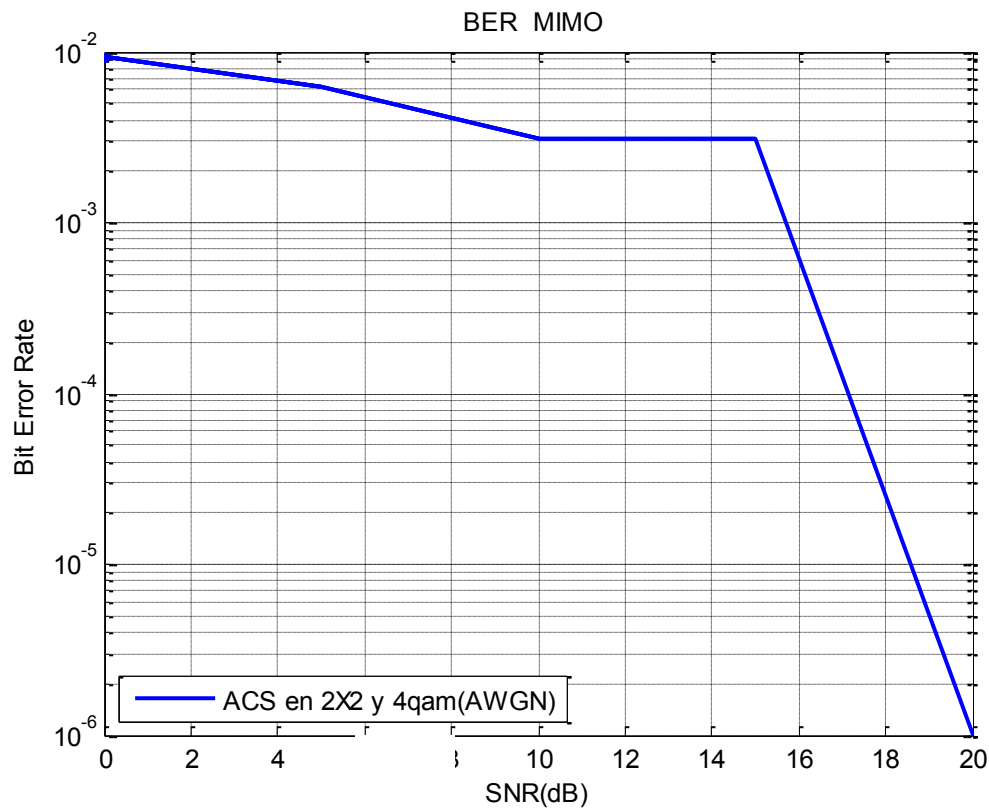


Figura 4.11. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS en un sistema MIMO 2x2.

4.2.2. Sistema MIMO 4x4

Se analiza la variación de los parámetros del Detector ACS y su impacto en el desempeño del mismo para un Sistema MIMO 4x4.

4.2.2.1. Variación del número de hormigas

Considerando la figura 4.12, con 5, 10, 15, 20 y 25 hormigas; puede decirse que la cantidad de hormigas que se utilice afecta el desempeño para valores de SNR entre 0 dB y 5 dB. Con 5 hormigas se alcanza una BER de 2.5×10^{-2} y con 20 hormigas se logra una BER de 10^{-2} . Cuando la SNR es mayor a 5 dB el comportamiento de las curvas es aproximadamente igual, sin embargo puede apreciarse que los menores valores de BER se obtienen con 20 hormigas. A medida que se incrementa la cantidad de hormigas por encima de 20, el Detector necesita más tiempo de

procesamiento. Los parámetros de configuración del algoritmo son $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$, $\tau=0.01$, $q_0=0.6$, $t_0=0.01$ y $\xi=0.01$.

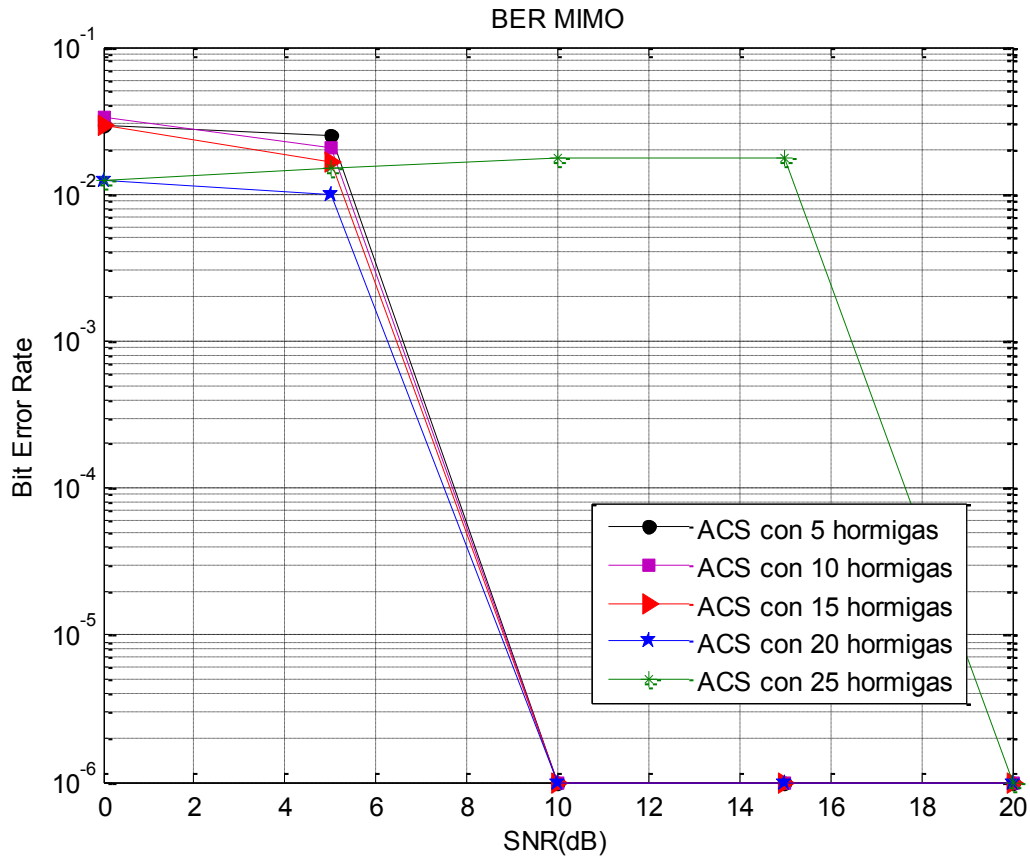


Figura 4.12. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el número de hormigas en un sistema MIMO 4x4.

4.2.2.2. Variación de α

En la figura 4.13 se ilustran las curvas de desempeño del Detector ACS considerando la variación de la constante α , los demás parámetros se fijan en 20 hormigas, $\beta=2$, $\rho=0.3$ y $\tau=0.01$. Para $\alpha=0.8$, se obtiene el peor desempeño dado que la SNR debe ser mayor o igual a 10 dB para que se presente disminución en la BER del sistema de forma considerable, y solo en 15 dB se alcanza el nivel de BER de 10^{-6} . En cambio para $\alpha=0.3$ y $\alpha=0.5$, a partir de una SNR de 5 dB la BER del sistema disminuye y con una SNR igual a 10 dB se consigue una BER de 10^{-6} , obteniéndose los menores niveles de BER con $\alpha=0.5$.

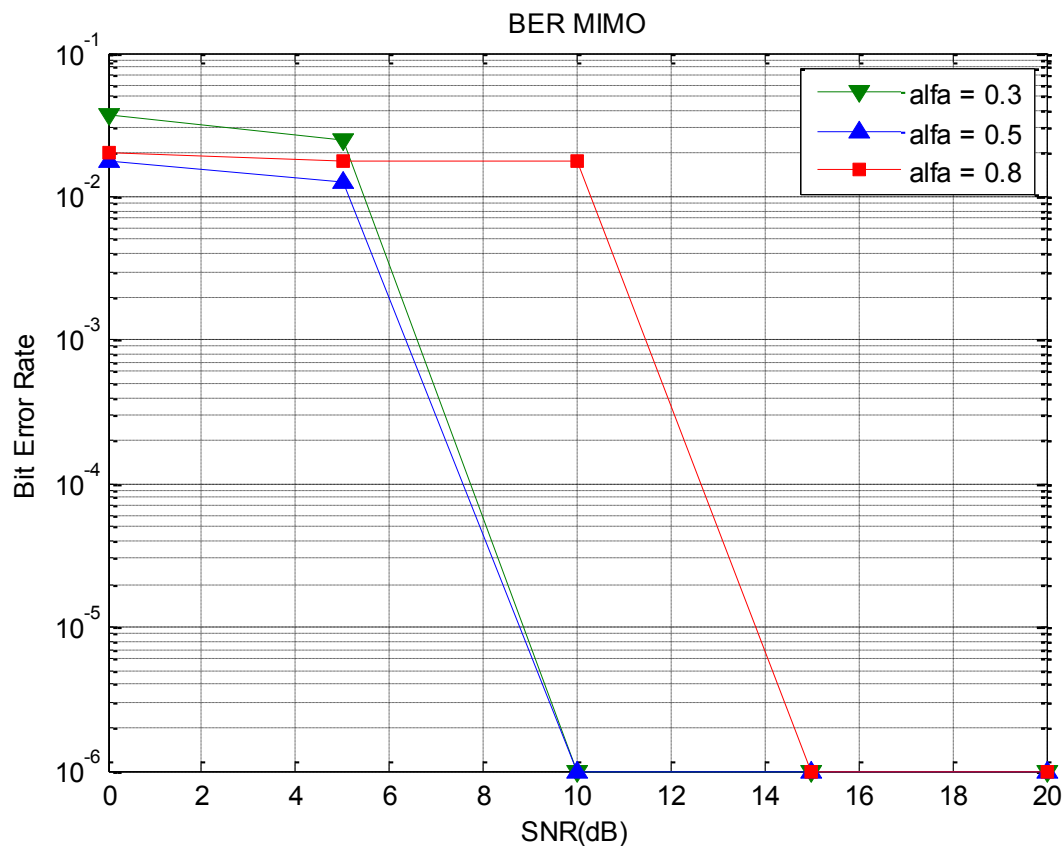


Figura 4.13. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando α en un sistema MIMO 4x4.

4.2.2.3. Variación del Factor de Evaporación

En la figura 4.14 la variación del Factor de Evaporación, afecta levemente el desempeño del detector ACS en el sistema MIMO 4x4. Se emplean los parámetros de configuración 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\tau=0.01$, $q_0=0.6$, $t_0=0.01$ y $\xi=0.01$. Existe una pequeña diferencia en los niveles de la BER cuando la SNR se encuentra entre 4 dB y 5 dB, donde se obtienen menores valores de BER con $\rho=0.3$.

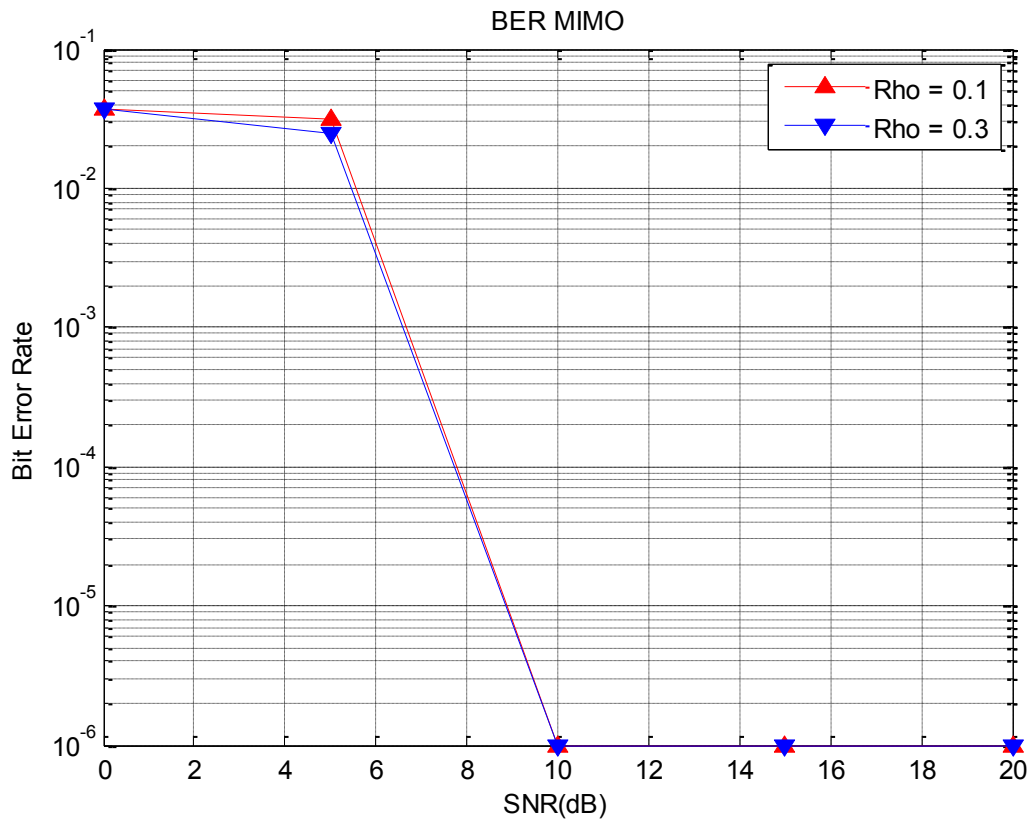


Figura 4.14. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS, variando el Factor de Evaporación en un sistema MIMO 4x4.

4.2.2.4. Variación de los parámetros adicionales

Se realizaron diferentes pruebas para determinar la configuración de los parámetros específicos del algoritmo ACS, y solamente se obtuvieron resultados satisfactorios con los valores especificados para τ inicial, q , q_0 , ξ y t_0 consignados en la tabla 4.2.

4.2.2.5. Elección de parámetros de configuración

Del análisis realizado se establecen los parámetros de configuración del Detector ACS para el sistema MIMO 4x4, tales como: 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.03$, $\tau=0.01$, $q_0=0.6$, $t_0=0.01$ y $\xi=0.01$. En la figura 4.15 se presentan los resultados del desempeño del Detector ACS, de acuerdo a los parámetros de configuración.

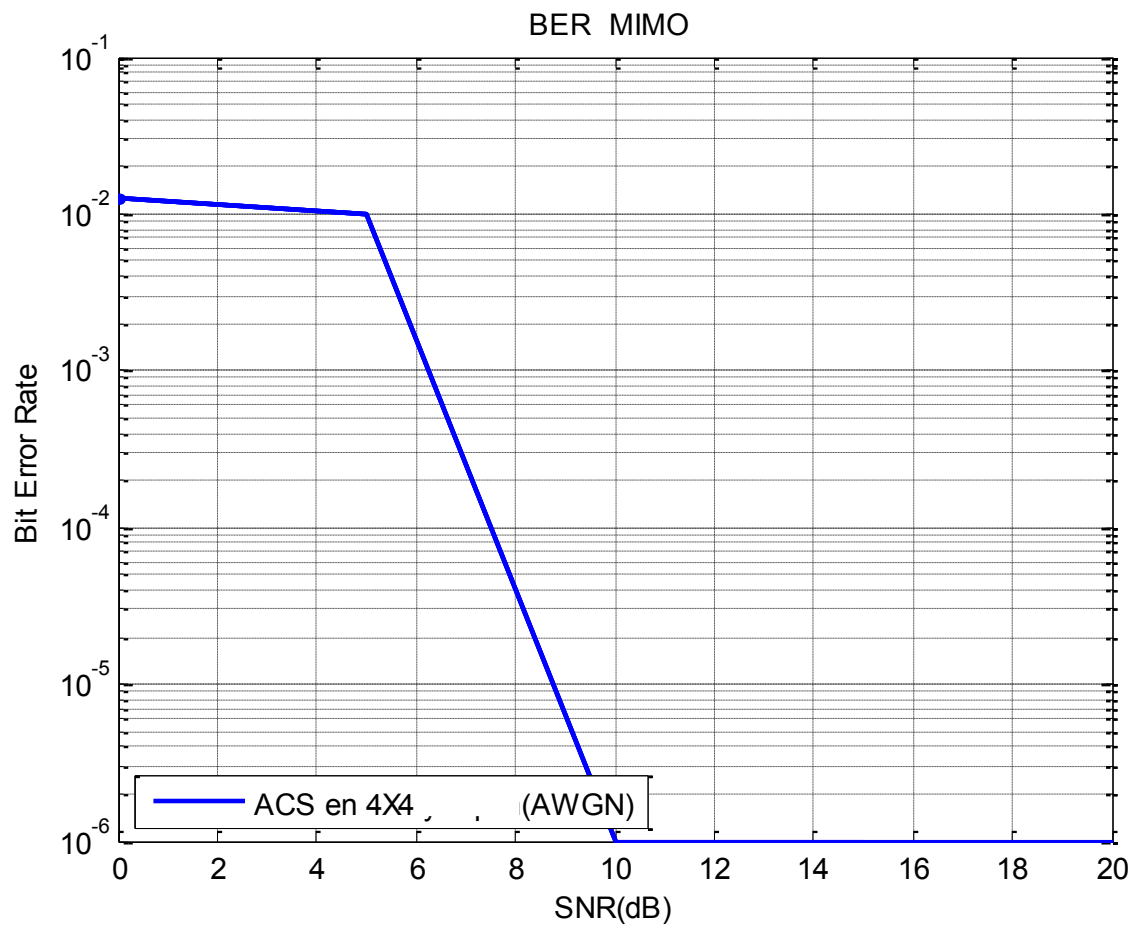


Figura 4. 15. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el Detector ACS en un sistema MIMO 4x4.

En la figura 4.15 se aprecia que para valores de SNR entre 0 dB y 5 dB, la BER decrece en una pequeña cantidad y logra un valor de 10^{-2} , posteriormente a medida que se incrementa la SNR la BER decrece, alcanzando un valor de 10^{-6} para una SNR igual a 10 dB. Con este detector se logran los menores valores de BER para una baja SNR.

4.3. Comparación de Resultados

4.3.1. Comparación de los detectores AS y ACS

En la figura 4.16 se presenta el desempeño de los detectores AS y ACS para el sistema MIMO 2x2 y 4x4. El detector que presenta el mejor desempeño es el Detector ACS tanto en el sistema MIMO 2x2 como en el 4x4.

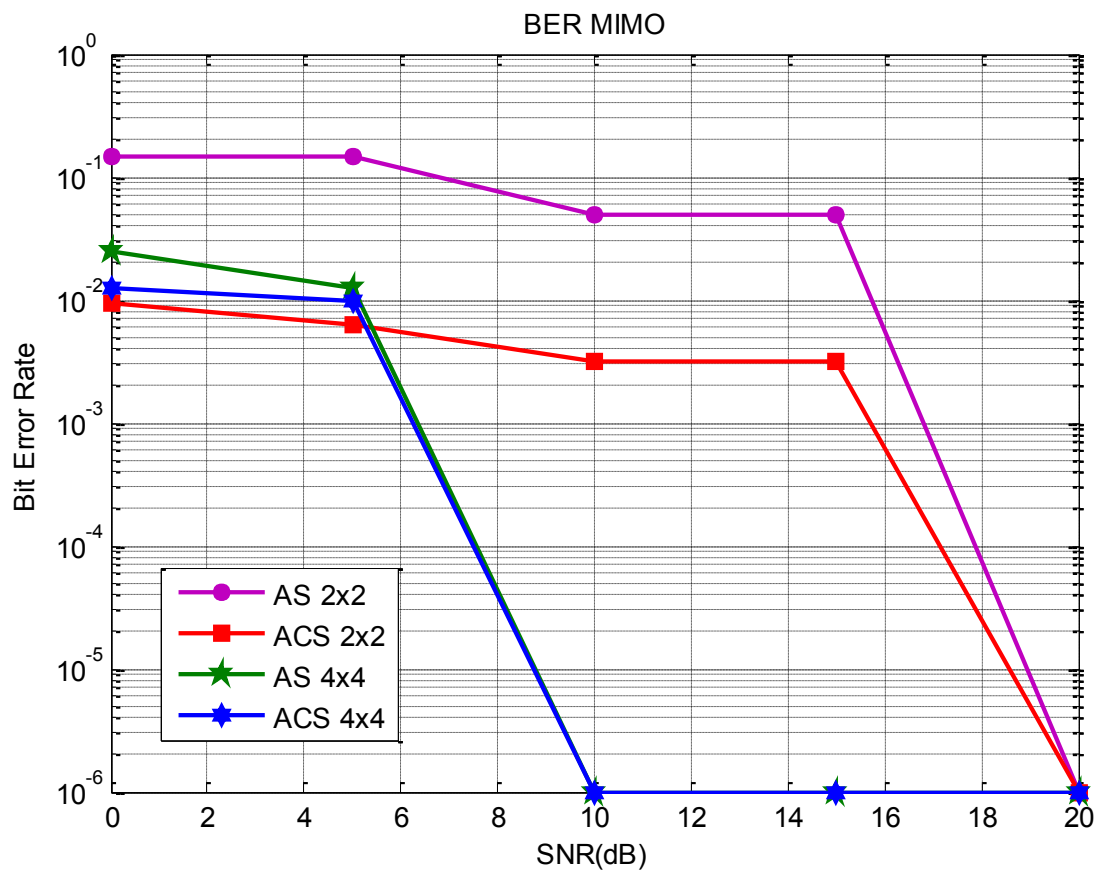


Figura 4. 16. Comparación Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para los Detectores AS y ACS.

En el sistema MIMO 2x2, los detectores AS y ACS para valores de la BER menores a 10^{-3} , se diferencian en el valor de SNR aproximadamente en 1.3 dB. Los detectores tienen una diferencia de 10 veces con respecto a los errores que se presentan para

SNR entre 0 y 15 dB, sin embargo presentan un comportamiento similar, logrando un valor muy pequeño de disminución de la BER a medida que la SNR se incrementa. Para valores de SNR mayores a 15 dB, la BER decrece y los detectores con una SNR de 20 dB alcanzan una BER de 10^{-6} .

En el sistema MIMO 4x4 se requieren menores valores de SNR para conseguir un valor particular de BER, esto se debe a la ganancia de arreglo que tiene el sistema 4x4 sobre el sistema 2x2. Para este sistema el comportamiento de los Detectores AS y ACS es muy aproximado y solo presenta algunas diferencias para valores de la SNR entre 0 dB y 5 dB, cuando existe una mejora en el desempeño del Detector ACS, en este rango la BER se mantiene alrededor de 10^{-2} . Si se incrementa la SNR de 5 dB a 10 dB, la BER tiende a cero para los dos Detectores.

4.3.2. Comparación entre algoritmos de detección

Para analizar el comportamiento de los algoritmos adaptados, diseñados e implementados, se compara su desempeño con el de los algoritmos ML, SD y SE en trabajos previamente desarrollados, considerando sistemas MIMO 2x2 y 4x4 con características similares a las analizadas en esta tesis.

4.3.2.1. Sistema MIMO 2x2

En la tabla 4.3 se consignan los resultados del análisis de desempeño de un sistema MIMO 2x2 con diferentes algoritmos tales como:

- Algoritmo de detección ML (1). (Kosmowski y Pawelec, 2011).
- Algoritmos Esféricos: con radio fijo y radio modificado (2) (Chen, 2004).
- Algoritmos ML y Esférico en un sistema con las mismas características del analizado, modulación QPSK, canal AWGN (3) (Caicedo y Medina, 2011).

De los resultados de la tabla 4.3 se afirma que el desempeño de los detectores es variable y depende del tipo de canal, número de tramas y estimación de canal empleada para la simulación del sistema MIMO. El algoritmo ML(1) tiene las mejores características dado que requiere los menores valores de SNR, en (3) se analiza un sistema MIMO con las mismas características del sistema analizado en esta tesis.

Tabla 4.3. Comparación de las curvas de desempeño de diferentes algoritmos en el sistema MIMO 2x2.

	Detector AS	Detector ACS	Algoritmo ML (1)	Algoritmo SD (2)	Algoritmo ML/SD (3)
BER	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)
10^{-1}	6.1	NA	0	8.5	4.3
10^{-2}	15.8	0	4	12	6
10^{-3}	16.5	15.8	7.5	13.8	6.5
10^{-4}	18	17	11	14.6	7
10^{-5}	19	18.5	15	15.6	7.5

Tabla 4.4. Diferencias en SNR para diferentes niveles de BER en el sistema MIMO 2x2.

	Diferencia AS – ML (1)	Diferencia ACS – ML (1)	Diferencia AS – SD (2)	Diferencia ACS – SD (2)	Diferencia AS – ML(3)	Diferencia ACS – ML (3)
BER	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
10^{-1}	6.1	NA	-2.4	NA	1.8	NA
10^{-2}	11.4	-4	3.8	12	9.8	-6
10^{-3}	9	8.3	2.7	2	10	9.3
10^{-4}	7	6	3.4	2.4	11	10
10^{-5}	4	3.5	3.4	2.9	11.5	11

De la tabla 4.4, con respecto al algoritmo ML (1), el detector ML tiene el mejor desempeño, dado que requiere menor SNR y la diferencia entre los valores de SNR requeridos por el Detector ML y el Detector AS o ACS, se incrementa a medida que el valor de la BER disminuye. Lo mismo sucede para el Detector AS cuando la BER es menor a 10^{-2} . Los detectores diseñados tienen un desempeño más pobre que el Algoritmo ML(1) empleado para el análisis. Entre el Detector AS y el ACS, tiene mejor comportamiento el Detector ACS para valores de BER mayores a 10^{-2} .

Al comparar los detectores AS y ACS con (2) se aprecia que solamente cuando la BER es igual a 10^{-1} , el Detector AS requiere menor SNR para alcanzar el mismo

valor de BER. Cuando la BER se decrementa, los detectores requieren mayor SNR para lograr el mismo desempeño que el alcanzado por el algoritmo SD. La diferencia entre algoritmo SD y el detector AS es de aproximadamente 3.3 dB y la del detector ACS es de 2.4 dB. Los detectores diseñados tienen un desempeño inferior al del Algoritmo SD.

Entre el Algoritmo ML (3) y los detectores AS y ACS se observan grandes diferencias con respecto a la SNR necesaria para alcanzar un nivel de BER, aproximadamente 10.5 dB para el Detector AS y 10.1 dB para el Detector ACS. Solamente para la BER de 10^{-2} , tiene mejor desempeño el Detector ACS. Para los demás valores el algoritmo que tiene mejor desempeño es el Algoritmo ML (3).

De la comparación realizada, los algoritmos diseñados tienen un desempeño cercano al algoritmo SD y ML. El Detector ACS tiene mejor comportamiento que el Detector AS, la diferencia en la SNR requerida para los valores de BER es aproximadamente de 1.5 dB, y disminuye a medida que la BER tiende a cero.

4.3.2.2. Sistema MIMO 4x4

De trabajos relacionados con el desempeño de un sistema MIMO 4x4 ante diferentes algoritmos de detección se obtienen los valores de la tabla 4.5. Los algoritmos analizados corresponden a:

- Algoritmos ML y Esférico (4) (Chen, 2004).
- Algoritmo SE original y algunas de sus modificaciones, considerando QPSK y 16QAM (5) (Zhao y Shi, 2006).
- Algoritmos ML y Esférico en un sistema con las mismas características del analizado, modulación QPSK, canal AWGN (6) (Caicedo y Medina, 2011).

En el sistema 4x4 cuando la SNR es igual a 0 dB, se obtiene una BER de 10^{-2} , por lo tanto se analiza la tabla 4.6 para valores menores a 10^{-2} .

Tabla 4.5. Comparación de las curvas de desempeño de diferentes algoritmos para el sistema MIMO 4x4.

	Detector AS	Detector ACS	Algoritmo ML/SD (4)	Algoritmo SE (5)	Algoritmo ML (6)
BER	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)
10^{-1}	NA	NA	8	2.5	8
10^{-2}	5	4	10.5	3.5	8.1
10^{-3}	6.1	6	12.1	4.6	8.4
10^{-4}	7.8	7.8	13.3	5.3	9.0
10^{-5}	8.8	8.8	14.5	6	9.4

Entre los detectores diseñados y el Algoritmo ML/SD (4), tienen mejor desempeño los detectores implementados, dado que para lograr una BER determinada se necesita menor valor de SNR. De acuerdo a la tabla 4.6, la ganancia de los detectores con respecto a (4) es de aproximadamente 5.6 dB para el Detector AS y 5.9 dB para del Detector ACS.

Tabla 4.6. Diferencias en SNR para diferentes niveles de BER en el sistema MIMO 4x4.

	Diferencia AS – ML/SD (4)	Diferencia ACS – ML/SD(4)	Diferencia AS – SE (5)	Diferencia ACS – SE (5)	Diferencia AS – ML (6)	Diferencia ACS –ML (6)
BER	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
10^{-1}						
10^{-2}	-5.5	-6.5	1.5	0.5	-3.1	-4.1
10^{-3}	-6	-6.1	1.5	1.4	-2.3	-2.4
10^{-4}	-5.5	-5.5	2.5	2.5	-1.2	-1.2
10^{-5}	-5.7	-5.7	2.8	2.8	-1.2	-1.2

En cambio, los detectores AS y ACS tienen un desempeño más pobre que el Algoritmo SE. Para valores de BER menores o iguales a 10^{-4} , la diferencia promedio en la SNR es de 2.65 dB. Para valores de la BER mayores a 10^{-4} , la diferencia

promedio en la SNR con el Detector AS es de 1.5 dB y con el Detector ACS es de 0.95 dB.

Considerando el Algoritmo ML (6), los detectores implementados tienen mejor desempeño que (6), para niveles de BER menores o iguales a 10^{-4} , los detectores tienen una ganancia de 1.2 dB. Cuando la BER tiene valores mayores a 10^{-4} la diferencia promedio en la SNR con el Detector AS es de 2.7 dB y con el Detector ACS es de 3.25 dB.

El Algoritmo ML (1) no especifica el tipo de canal que emplea y tampoco el número de tramas utilizadas, razón por la cual se considera que los valores de SNR son altos comparados con los del Algoritmo (2) y (3).

Los detectores AS y ACS tienen un desempeño aproximado al de los algoritmos ML y SE, entre los dos detectores diseñados se presenta una leve diferencia en los niveles de SNR requeridos para lograr una BER determinada, pero el que presenta mejor comportamiento es del Detector ACS.

Capítulo 5

Conclusiones

Existen diferentes tipos de Algoritmos de Optimización Basada en colonias de Hormigas, los cuales han sido empleados para la solución de problemas NP. Este trabajo explora la utilización del algoritmo del Sistema de Hormigas y el Sistema de Colonias de Hormigas, encontrando resultados favorables con los detectores implementados para resolver el problema de la detección de señal en sistemas MIMO.

Adaptar un algoritmo de colonias de hormigas requiere realizar múltiples iteraciones del algoritmo para determinar los parámetros de configuración que permitan alcanzar la solución del sistema. Para el caso del Detector AS, fue necesario determinar el valor adecuado para seis parámetros y para el Detector ACS se analizaron nueve parámetros. Dorigo recomienda una configuración de parámetros, sin embargo esta cambia de acuerdo al problema al cual se aplica la OCH. Este proceso conlleva largos tiempos de simulación para la determinación de los mejores parámetros, una vez que se encuentran dichos valores, los tiempos de simulación del algoritmo se reducen considerablemente.

El Detector AS no depende de variables aleatorias a diferencia del Detector ACS, este último considera variables aleatorias adicionales para la actualización local de feromona, lo cual lleva a que el algoritmo tenga un comportamiento aleatorio. La regla pseudoaleatoria para la actualización de feromona solo se aplica en algunas ocasiones y por tanto la solución que brinda no depende directamente de la función de evaluación empleada, sino de los valores aleatorios que tomen dichas variables.

Para la adaptación de los algoritmos de OCH fue muy importante el uso de una metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones, lo cual permitió partir del problema a solucionar y llegar hasta un algoritmo que brinda una solución, siguiendo una serie ordenada de pasos que garantizan la correcta comprensión y abstracción del sistema.

Para encontrar los rangos de variación de los parámetros de los algoritmos, se analizaron diferentes variantes del sistema implementado, teniendo en cuenta las recomendaciones de los creadores de OCH y también las recomendaciones en aplicaciones del algoritmo a problemas similares como el del viajante del comercio. De este modo fue posible determinar los rangos de funcionamiento de los detectores planteados en esta tesis.

Se adaptaron, diseñaron e implementaron los Algoritmos de Hormigas para el problema de detección de señal en sistemas MIMO, los cuales brindan buenos resultados en cuanto al desempeño, tanto para el sistema 2x2 y 4x4. Cuando $\beta=2$, se pueden emplear diferentes configuraciones de las variables y las gráficas varían levemente en los valores de BER. Sin embargo, los detectores implementados ofrecieron un buen desempeño cuando se emplearon 20 hormigas, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\rho=0.3$, y $\tau=0.01$.

Los detectores AS y ACS presentan mejor comportamiento en el sistema MIMO 4x4, dado que se explota la ganancia de arreglo del sistema 4x4, lo cual disminuye los valores SNR requeridos para alcanzar una BER determinada.

En el sistema MIMO 2x2 los detectores AS y ACS, presentan un buen comportamiento para valores de SNR mayores a 15 dB, porque para valores menores, la disminución de la BER con el incremento de SNR es mínima, en este

rango el Detector ACS logra menores valores de la BER. En cambio cuando la SNR es mayor a 15 dB, la BER disminuye rápidamente, y en 20 dB de SNR alcanza una BER de 10^{-6} .

En el sistema MIMO 4x4 el desempeño de los Detectores AS y ACS es aproximadamente el mismo para valores de SNR mayores a 5 dB, para valores menores el detector ACS tiene un mejor comportamiento. Estos detectores logran una BER de 10^{-6} con 10 dB de SNR, y presentan un mejor desempeño en el sistema MIMO 4x4 que en el 2x2.

El número de hormigas adecuado para los detectores es de 20, si se trabajan con un valor superior es probable que el aumento en la SNR no conlleve a la disminución en el valor de la BER, pero si incrementa el tiempo necesario para encontrar una solución y por lo tanto afecte el desempeño de los detectores.

La variación de los parámetros de configuración de los Detectores AS y ACS impactan en el desempeño, para SNR menores a 15 dB y 5dB respectivamente. En este rango se escogieron los parámetros de configuración con los cuales se obtienen los menores valores de la BER. Dado que para SNR mayores a los valores umbrales, el desempeño era el mismo para los diferentes parámetros.

Los tiempos necesarios para la ejecución de los detectores es mucho menor al empleado por los algoritmos ML y SE, y depende del número de hormigas, dado que se deben realizar los procesos tantas veces como hormigas emplee el detector. Entre los dos detectores diseñados, emplea menos tiempo el Detector AS dado que realiza menos comparaciones en la construcción de la solución y en la actualización de la feromona. Los detectores requieren más tiempo para encontrar el símbolo enviado en el sistema 4x4, dado que el árbol del problema tiene un mayor número de niveles para analizar.

Para la simulación es importante utilizar un equipo con alta capacidad de procesamiento, dada la cantidad de operaciones necesarias para la realización de los algoritmos, en el Detector ACS se requiere mayor tiempo y capacidades, igualmente para el sistema 4x4.

Los Detectores ACS y AS pueden ser empleados para la detección de señal, logrando desempeños aproximados a los alcanzados con los algoritmos óptimos como el SD y el SE. Pero para su implementación práctica es necesario revisar los rangos de los parámetros de configuración para brindarle estabilidad a los algoritmos.

Este trabajo consideró condiciones ideales para un sistema de comunicación, en trabajos futuros, es pertinente analizar el comportamiento de los algoritmos diseñados en: canales con diferentes tipos de desvanecimiento, sistemas sin conocimiento perfecto del canal con esquemas de modulación 16QAM y un mayor número de antenas. Además deben considerarse esquemas multiusuario dado que los sistemas de 3G y 4G que emplean MIMO tienen esta característica.

La configuración de los parámetros de los algoritmos tomo un tiempo largo, existían múltiples opciones para realizar la variación y el análisis de los mismos, sin embargo solo se analizó el impacto de la variación individual de cada parámetro sobre el comportamiento del sistema, siendo adecuado realizar en trabajos futuros, un estudio multivariado, donde se considere la variación simultanea de los parámetros de configuración de los algoritmos.

Apéndice A

Tipos de OCH

Existen diferentes tipos de algoritmos de colonias de hormigas, sin embargo solo se presentan los que se consideraron para realizar esta tesis.

A.1. Ant System (AS)

Fue el primer sistema y representa el comportamiento de las hormigas de forma casi exacta. En este sistema se basan las variantes que surgieron posteriormente (Dorigo y Maniezzo, 1996). A continuación se presenta el algoritmo de acuerdo a los tres pasos establecidos.

A.1.1. Construcción de la solución

Para que una hormiga construya una solución a un problema específico, debe recorrer una ruta en el árbol de búsqueda, conformada por un conjunto de nodos a través de los cuales se mueve de acuerdo a decisiones probabilísticas. Cuando una

hormiga se encuentra en un nodo del grafo, para decidir el nodo hacia el cual debe dirigirse sigue una regla de transición dada por:

$$\Delta\rho_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha n_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} n_{il}^\beta \tau_{il}^\alpha} & \text{si } j \text{ pertenece a } K \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Donde α y β son los parámetros que controlan la importancia relativa de la feromona y la información heurística dadas por:

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (\text{A.2})$$

Donde d_{ij} es la longitud del arco que une los nodos (i,j) del grafo.

N_i^k representa los nodos a los que se puede mover la hormiga. Si α es cero los nodos más cercanos tienen mayor probabilidad de ser escogidos, si α es mayor que 1 todas las hormigas siguen el mismo camino y construyen el mismo trayecto. Si β es cero solo se tienen en cuenta los rastros de feromona para la elección, lo cual puede generar un estancamiento rápido del algoritmo, porque las hormigas siempre siguen las mismas soluciones, y por lo tanto es necesario establecer un equilibrio entre la información heurística y la información de los rastros de feromona (Dorigo y Stutzle, 2006). Finalmente, una hormiga se mueve al nodo que tiene el valor más alto de $\Delta\rho_{ij}^k$.

La construcción de la solución se puede realizar de forma secuencial o paralela. El desempeño de este algoritmo decrece rápidamente a medida que se incrementa el tamaño de las instancias de prueba. En esta tesis las hormigas construyen la solución de forma secuencial.

A.1.2. Actualización de la feromona

Una vez que las hormigas completan el recorrido, es necesario depositar feromona para marcar los trayectos recorridos, esto se realiza de acuerdo a la expresión:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{K=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in L \quad (\text{A.3})$$

donde m el número de hormigas

$\Delta\tau_{ij}$ es la cantidad de feromona por unidad de longitud depositada en el trayecto (i,j) por la hormiga k y está dada por la ecuación A.4.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_Q} & \text{si la hormiga } k \text{ usa el borde } (i,j) \text{ en su ruta} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Q es una constante y L_Q es la longitud de la ruta seguida por la hormiga.

A.1.3. Evaporación de la feromona

El algoritmo simula el efecto natural de evaporación de la feromona, de acuerdo a la expresión:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (1 - \rho)\tau_{ij} & \forall (i,j) \in L \\ 0 &< \rho \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Donde ρ es el Factor de Evaporación de la feromona. Se utiliza para evitar la acumulación ilimitada de trayectos de feromona y permitir que el algoritmo olvide decisiones equivocadas del pasado, eliminando parte de la feromona depositada en los trayectos a medida que transcurre el tiempo.

A.1.4. Acciones Adicionales

En esta versión del algoritmo no se implementan tareas distintas a las del ambiente natural, por lo tanto no se tienen acciones adicionales.

A continuación se presentan algunas variantes del algoritmo de colonias de hormigas original.

A.2. Sistema Max – Min

Propuesto por Stutzle y Hoos (Stutzle y Hoos, 1996), quienes realizaron algunos cambios al original, buscando mejorar la eficiencia del algoritmo:

- Solamente la mejor hormiga puede actualizar los trayectos de feromona.
- Los valores mínimos y máximos de la feromona se limitan para evitar que las hormigas se estanquen en una solución que no sea la mejor.
- Los trayectos de feromona inician en el límite mínimo, para beneficiar la exploración de rutas al comienzo de la búsqueda.
- Los trayectos de feromona se reinician cada vez que la búsqueda se estanca o cuando no se ha generado una mejor ruta sobre un numero de iteraciones consecutivas.

La construcción de la solución se mantiene igual. A continuación se presentan los pasos que tienen modificaciones con respecto al algoritmo original.

A.2.1. Actualización

La actualización de la feromona se realiza así:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{best} \quad \forall (i, j) \in L \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta\tau_{ij}^{best} = \frac{1}{C^{best}} \quad (\text{A.7})$$

La hormiga a la cual se le permite adicionar feromona puede ser la que ha construido la mejor ruta hasta el momento $\Delta\tau_{ij}^{best} = 1/C^{best}$, o la mejor iteración la cual depende de $\Delta\tau_{ij}^{best} = 1/C^{ib}$, donde C^{ib} es la longitud de la mejor iteración. Generalmente se usan alternadamente cada una de las reglas de actualización.

Los límites de los valores de feromona se escogen buscando que el algoritmo no se estanque en una solución que no es la óptima, por tanto el valor máximo se estima como:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{\rho} * \frac{1}{c^{bs^*}} \quad (\text{A.8})$$

Cada vez que se encuentra una mejor ruta, el valor de τ_{\max} se actualiza, para el valor mínimo se emplea:

$$\tau_{\min} = \frac{\tau_{\max}}{a} \quad (\text{A.9})$$

Donde a es un parámetro de configuración.

A.2.2. Acciones adicionales

Consisten en encontrar la mejor ruta hasta el momento o la mejor iteración una vez hayan terminado la construcción de la solución todas las hormigas, para depositar feromona.

A.3. Sistema de Colonias de Hormigas

Dorigo & Gambardella trabajaron una nueva variante de AS (Dorigo y Gambardella, 1997), la cual emplea una regla de transición más fuerte, actualiza la feromona solamente en la mejor ruta, y cada vez que una hormiga usa un trayecto del árbol, se remueve algo de feromona del mismo para incrementar la exploración de otros trayectos y evitar el estancamiento del algoritmo (Dorigo y Stutzle, 2006; Dorigo y Stutzle, 2004).

A.3.1. Construcción de la solución

Para que una hormiga k ubicada en un nodo i del grafo decida hacia donde debe moverse, se emplea una nueva regla proporcional pseudoaleatoria dada por:

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in N_i^k} \{\tau_{il} [n_{il}]^\beta\}, & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Donde q es una variable aleatoria, uniformemente distribuida entre $[0,1]$, q_0 es una variable que se encuentra en el rango $(0 < q_0 < 1)$ es un parámetro y J es una variable aleatoria seleccionada de acuerdo a la distribución de probabilidad dada por la ecuación (A.1) con $\alpha = 1$.

A.3.2. Actualización

En ACS solo deposita feromona la hormiga de la mejor ruta encontrada hasta el momento R^{bs} , la actualización se realiza así:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad \forall (i,j) \in R^{bs} \quad (2.28)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs} \quad (2.29)$$

Este algoritmo es uno de los más empleados por su buen desempeño y complejidad moderada.

A.3.3. Acciones adicionales

Consisten en realizar la evaporación de la feromona en los trayectos o nodos visitados por la hormiga, y analizar todos los recorridos de las hormigas para seleccionar aquel que brinde la mejor solución.

Apéndice B

Descripción del Sistema en Matlab

A continuación se realiza la descripción de las funciones a las asociadas a los algoritmos de detección desarrollados.

B.1. Funciones principales

Funcion MIMO System

Entradas: Ninguna.

Salidas: Gráficas de la SNR vs BER en el sistema MIMO 2x2 y 4x4.

Descripción : Archivo principal que se encarga de generar el sistema MIMO 2x2 o 4x4 e invoca a las demás funciones que permiten simular el comportamiento del sistema total.

Funcion transmission System

Entradas: Energia, puntos de la constelación, numero de tramas, longitud de la trama.

Salidas: Errores durante la transmisión.

Descripción: Esta función se encarga de generar los datos a transmitir por el sistema MIMO y el canal de radio AWGN. Posteriormente envía los datos por el canal, y detecta los datos que llegan al receptor, utilizando los detectores desarrollados, y calculando la cantidad de errores en los datos transmitidos.

Funcion AntSystem

Entradas: Símbolos recibidos, Energía, Matriz del Canal, Amplitudes de la modulación.

Salida: símbolo detectado.

Descripción: Realiza la detección de los símbolos que llegan al receptor del sistema MIMO, para esto utiliza la energía de los bits, la matriz del canal y las amplitudes del esquema de modulación. El detector está basado en el Algoritmo del Sistema de Hormigas y utiliza otras funciones para desarrollar sus procesos.

Funcion Ant Colony System

Entradas: Símbolos recibidos, Energía, Matriz del Canal, Amplitudes de la modulación.

Salida: Símbolo detectado.

Descripción: Realiza la detección de los símbolos a partir de la señal recibida, para esto utiliza la energía de los bits, la matriz del canal y las amplitudes del esquema de modulación. El detector está basado en el Algoritmo del Sistema de Colonias de Hormigas y utiliza otras funciones auxiliares.

B.2. Funciones de los detectores

Los detectores MIMO diseñados se implementan de acuerdo a las fases establecidas por los algoritmos de colonias de hormigas, las fases y funciones principales correspondientes se presentan a continuación.

B.2.1. Fase de Inicio del Algoritmo

Funcion iniciar parámetros

Entradas: Amplitudes de la modulación, Estados, Numero de hormigas (AntNum), α , β y ρ .

Salidas: Configuración de las hormigas (ASOption).

Descripcion: Se encarga de configurar los parámetros del sistema de hormigas, tales como el número de hormigas, las constantes α , β y ρ .

Funcion IniciarProblema

Entradas: Señal recibida, amplitudes del esquema de modulación, canal de radio.

Salida: Problema configurado.

Descripcion: inicializa los valores del problema, tales como la matriz de feromonas, la matriz de probabilidad, y realiza el cálculo de la función de evaluación del algoritmo.

B.2.2. Fase Construcción de la solución

Funcion ConstruirSolucion

Entradas: Y, Canal, Estados.

Salidas: Símbolos que representan la solución.

Proceso: Función general que se encarga de explorar el árbol de búsqueda, calcular las probabilidades de cada nodo, determinar el movimiento de la hormiga y construir una ruta de acuerdo a los rastros de feromona. La función de cálculo de probabilidad es diferente para cada uno de los tipos de algoritmos.

B.2.3. Fase de actualización de la feromona

Funcion actualizar Feromona

Entradas: delta, τ .

Salida: indicador de actualización de feromona.

Proceso: En el caso del Detector AS, de acuerdo a la calidad de la solución encontrada por una hormiga (valor de delta), se analiza la ruta que siguió la hormiga y se deposita feromona en los trayectos correspondientes. Para el Detector ACS, se

busca cual hormiga construyó la mejor solución, se analiza la ruta que siguió y solo ella puede actualizar la cantidad de feromona en los trayectos correspondientes.

Referencias

- Artez, H.; Seethaler D., et al., (2003). Efficient Detection Algorithms for MIMO Channels: A Geometrical Approach to Approximate ML Detection, IEEE transactions on signal processing, Vol. 51, no. 11, pp. 2808-2820.
- Astaiza, E.; Bermudez, H. y Muñoz, P. (2007). *Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones*. Arte e Imagen.
- Barbero, L. y Thompson, J. (2006). Rapid Prototyping of MIMO Algorithms for OFDM WLAN, *Communication*, IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey.
- Ben O. G. y Ouertani, R. (2008). Hard and soft Spherical Bound Stack decoder for MIMO Systems. ArXiv, Article No. 0811.1000. Accedido el 15 Mayo de 2010 en <http://arxiv.org/abs/0811.1000>.
- Bolcskei, H.; Gesbert, D. et al. (2006). *Space-Time Wireless Systems: From Array Processing to MIMO Communications*. Cambridge University Press. p. 582.
- Chen S. (2004). *The Sphere Decoding Algorithm Applied, to Space-Time Block Codes*. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Darquennes, D. (2005). *Implementation and Applications of Ant Colony Algorithms*, M.Sc. Tesis, University of Namur, Belgium.

- Darquennes, D. (2005). Implementation and Applications of Ant Colony Algorithms, M.Sc. Tesis, University of Namur, Belgium.
- Dorigo, M. y Gambardella, L. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Estados Unidos, Vol 1, no. 1, pp. 53-66.
- Dorigo, M. y Stützle T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Bradford Books.
- Dorigo, M. y Stutzle, T. (2004). Ant colony optimization. IEEE Computational Intelligence Magazine, MIT Press, pp. 28-39.
- Dorigo, M. y Stutzle, T. (2006). The Ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications and Advances, en Handbook of Metaheuristics, Vol. 57, Ed. Springer New York, pp. 250-285.
- Dorigo, M.; Di Caro, G. y Gambardella, L. (1999). Ant algorithms for discrete optimization, Artificial Life. Vol. 5, no. 2, pp. 137 - 172.
- Dorigo, M.; Maniezzo, V. et al. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part-B, Vol 26, no. 1, pp. 1-13.
- Duarte, A. (2007). Panorámica de los procedimientos metaheurísticos, en Seminario Sobre Sistemas Inteligentes, pp. 331-341.
- Foschini, G. y Gans, M. (1998). On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas, Wireless Personal Communications. Vol. 6, no. 3, pp. 311–335.
- Gestbert, D.; Shafi M.; et al. (2003). From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space–Time Coded Wireless Systems, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 21, no. 3, pp. 281-302.

-
- Hernandez, C y Jojoa, P. (2010). Detección de Señal en un Sistema MIMO Empleando Algoritmos de Colonas de Hormigas, *ENTRE CIENCIA E INGENIERÍA*. Vol. 4, No. 8, pp. 52-66.
- Kosmowski, K. y Pawelec, J. (2011). A comparison of Receiver Strategies in STBC MIMO Systems in a Challenging Environment, presentado en CTRQ 2011, The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service. Hungary, pp. 133-136.
- Mahesh K.; Yi J. y Varanasi J. (2007), Performance Analysis of ZF and MMSE Equalizers for MIMO Systems: An In-Depth Study of the High SNR Regime. *IEEE Transactions, Information Theory*.
- S. Alonso, O. Cerdón, et al. (2004). La Metaheurística de Optimización Basada en Colonias de Hormigas: Modelos y Nuevos Enfoques, en *Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización*, Ed. Universidad de Málaga, pp. 261-314.
- Sharmin M. (2007). Maximum Likelihood Detection in Communication using Metaheuristic Search Methods, Master of Science. Universidad de Alberta.
- Stutzle T. y Hoos H. (2000). MAX-MIN Ant System, *Journal of Future Generation Computer Systems*. Vol. 16, pp. 889-914.
- Stützle, T.; Hoo, H. (1996). Improvements on the Ant System: Introducing Max-Min Ant System, *International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*, Viena – Austria, Springer Verlag, 1998. pp. 245-249.
- Su K. (2005). Efficient Maximum Likelihood Detection for Communication Over Multiple Input Multiple Output Channels, Tesis de posgrado. University of Cambridge.
- Telatar, E. (1999). Capacity of multiantenna Gaussian channels, *European Transactions on Telecommunications*. Vol. 10, no. 6, pp. 585-595.

Zhao, M.; Shi, Z. y Reed, M.C. (2008). Modified Schnorr-Euchner Sphere Decoding for Iterative Spatial Multiplexing MIMO Receiver. The 10th ISSSTA 2008 Creating New Dimensions in the Wireless World.