

Detección de Señal en un Sistema MIMO Empleando Algoritmos de Colonias de Hormigas¹

Signal Detection in a MIMO System Using the Ant Colony Algorithm

Claudia Milena Hernández Bonilla

*Estudiante de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones
Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones
Docente Asistente Universidad del Cauca
Grupo I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
claudiah@unicauca.edu.co*

Pablo Emilio Jojoa Gómez

*PhD. en Ingeniería Eléctrica
Magister en Ingeniería Eléctrica
Ingeniero en Electrónica
Docente Titular Universidad del Cauca
Grupo I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
pjojoa@unicauca.edu.co*

Recibido Septiembre 05 de 2010 – Aceptado Diciembre 13 de 2010

SÍNTESIS

Los usuarios de los servicios de telecomunicaciones cada vez demandan mayores servicios a los operadores; se espera que los sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) puedan satisfacer estas necesidades. Para ello es necesario proveer mecanismos que permitan la implementación de estos sistemas y facilitar su máximo aprovechamiento.

¹ Documento derivado del proyecto de investigación “Detección de señal en un sistema MIMO empleando optimización basada en colonias de hormigas”, desarrollado como requisito para optar al título de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones realizada en la Universidad del Cauca, bajo la Tutoría del PhD. Pablo Emilio Jojoa Gómez.

La detección es una etapa crítica considerando que la complejidad del sistema puede incrementarse drásticamente a medida que se mejora el desempeño del algoritmo para tal fin, lo que se constituye en un problema de tipo no polinomial (NP). Diferentes investigaciones que buscan reducir el número de operaciones matemáticas asociadas al algoritmo y mejorar su desempeño se han desarrollado al respecto.

En los últimos años se han empleado las metaheurísticas para solucionar problemas NP; se propone pues, el análisis de un detector de señal para un sistema MIMO utilizando los Algoritmos de Colonias de Hormigas.

Descriptores: *detección, sistemas MIMO, Algoritmos de Colonias de Hormigas, desempeño.*

ABSTRACT

Telecommunications systems users demand more services from operators every day; it is expected that the Multiple Input and Multiple Output (MIMO) Systems will satisfy those needs. It is necessary to provide mechanisms for implementing these systems and to facilitate their maximum use in order to get those objectives.

Detection is a critical step considering that the complexity of the system can increase dramatically while a detection algorithm performance is improved, which is a Non-deterministic Polynomial time (NP) problem. Different studies have been implemented in order 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; this paper presents the analysis of a signal detector for a MIMO system using the Ant Colony Algorithm.

Descriptors: *detection, MIMO Systems, Ant Colony Algorithm, performance.*

1. INTRODUCCIÓN

La explotación del dominio espacial es una forma de incrementar la capacidad de los sistemas inalámbricos; recientemente han surgido nuevos métodos y esquemas que emplean la diversidad espacial, tales como el uso de múltiples antenas a cada lado del enlace (Gestbert & Shafi, 2003). Estos se conocen como sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), estudiados desde hace más de una década por Foschini, Tarok y Telatar (Foschini & Gans, 1998; Telatar, 1999). Dichos sistemas emplean arquitecturas con múltiples antenas en transmisión y recepción, donde, realizando una explotación eficiente de la diversidad y la multiplexación espacial se puede incrementar la capacidad y/o velocidad de transferencia del sistema, sin embargo estas prestaciones incrementan notoriamente el procesamiento requerido en el receptor (Oestges & Clerckx, 2007; Foschini, 1996; Molisch, 2005).

El desempeño del sistema MIMO depende fuertemente del algoritmo de detección empleado en el receptor (Artez et al., 2003; Waters & Barry, 2008). Se tienen dos tipos de detección, de un lado, los detectores óptimos como el algoritmo esférico y el algoritmo Schnor – Euchner, cuya complejidad se incrementa drásticamente de acuerdo al tamaño de la constelación de la señal modulada, pero tienen un desempeño cercano al óptimo. Por otro lado, están los detectores subóptimos como el ZF (Zero Forcing), ZF DFE (Zero Forcing Decision Feedback Equalizer), MMSE (Minimum Mean Square Error), y MMSE DFE (Minimum Mean Square Decision Feedback Equalizer), (Barbero & Thompson, 2006), con baja complejidad pero pobre desempeño (Ben Othma & Ouertani, 2009). La solución óptima en la etapa de detección es el algoritmo de Máxima Verosimilitud, sin embargo su alta complejidad lo hace poco práctico y es considerado como un problema de tipo NP (Non-deterministic Polynomial time) (Bolcskei et al., 2005; Khan et al., 2007). Por lo tanto, se exploran formas alternativas de detección utilizando una metaheurística poblacional, tal como los Algoritmos de Colonias de Hormigas (ACH) (Duarte, 2007; Pantrigo, 2005).

Las metaheurísticas son estrategias empleadas para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento, este término fue propuesto por Fred Glover en 1986 (Marti, 2009). Desde entonces, se han presentado múltiples pautas para resolver problemas de asignación de recursos, planificadores, enrutamiento vehicular, entre otros (Krzysztof & DorigoD, 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 las metaheurísticas de Algoritmos de Coloniasde Hormigas (Marti, 2009; Krzysztof & DorigoD, 2008; Dorigo et al., 1999). Teniendo en cuenta que el problema de la detección es de tipo NP, y que los Algoritmos de Coloniasde Hormigas han sido utilizados para resolver problemas de este tipo, en este artículo se presenta un análisis de la aplicación de los ACH a la detección de señal en un sistema MIMO.

El artículo presenta en la sección uno, el marco teórico correspondiente al tópico en mención; en la segunda parte, el desarrollo del tema que comprende la temática de los Algoritmos de Coloniasde Hormigas, el sistema MIMO, y la aplicación de ACH a la detección de señal en MIMO; en la sección tres se presentan las conclusiones del trabajo.

2. DESARROLLO

2.1 Los algoritmos de colonias de hormigas

Las hormigas son insectos sociales que viven en colonias, se caracterizan por buscar la supervivencia colectiva por encima de la individual y pueden encontrar los caminos más cortos entre el alimento y el hormiguero (Dorigo et al., 1999). Las investigaciones han demostrado que los ACH son muy efectivos para resolver un amplio rango de problemas que se consideran NP Hard (Dorigo et al., 1999; Dorigo & Stutzle, 2006; Singh et al, 2005).

El primer sistema de hormigas fue planteado por Marco Dorigo en 1992, "ANT System (AS)", 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 ACH se pueden nombrar: “Elitist AS (AS)”, “Rank-based AS”, “MAX - MIN AS” y “Ant Colony System (ACS)” (Dorigo et al., 1999; Dorigo & Stutzle, 2006; Darquennes, 2005).

Los tipos de ACH que se utilizarán para el detector de señal en un sistema MIMO son: el Algoritmo de Colonias de Hormigas original AS y el algoritmo ACS. Todas las variantes de AS parten del algoritmo original y han realizado modificaciones en la forma de actualizar la feromona o de elegir la ruta, sin embargo tienen mecanismos de búsqueda más efectivos que el mecanismo original. Por lo tanto se usará el algoritmo AS porque a partir de él se pueden implementar sus variantes. También se escoge el algoritmo ACS porque, según la literatura del tema, brinda el mejor desempeño en términos del tiempo computacional y de la calidad de las soluciones; por lo tanto se espera que la calidad de la solución obtenida con el algoritmo ACS sea mejor que la obtenida con el algoritmo AS.

Los pasos necesarios para aplicar los Algoritmos de Colonias de Hormigas a un problema específico son: diseñar el grafo de construcción, definir las restricciones del problema, definir la información de los trayectos de feromona, inicializar el sistema, construir la solución, actualizar la feromona y analizar los resultados.

2.2 Sistema MIMO

2.2.1 Modelo del sistema

En la figura 1 se presenta un sistema MIMO (Gestbert et al., 2003; Bolcskei et al., 2005).

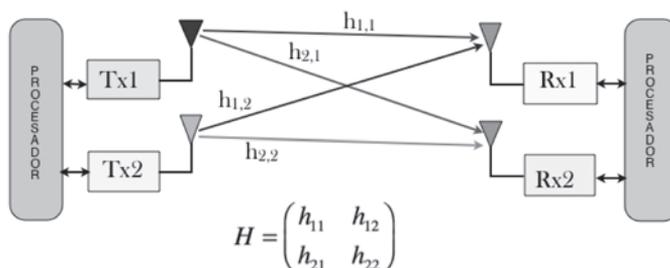


Figura 1. Diagrama general de un sistema MIMO

En la figura 2, se esquematiza el diagrama de bloques del sistema MIMO utilizado para el análisis del trabajo, este corresponde a un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4, con canal

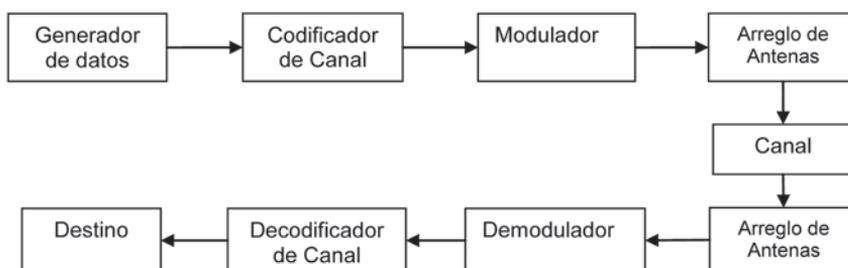


Figura 2. Diagrama en bloques del sistema MIMO

Rayleigh invariable en el tiempo, conocimiento perfecto del canal, desvanecimiento plano y modulación QPSK.

Es importante resaltar que los algoritmos de detección de señal a modelar e implementar forman parte del Decodificador de canal.

2.2.2 Detección en MIMO

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

$$Y = HS + N \quad (1)$$

La señal S es un vector $M \times 1$, Y es un vector $N \times 1$, H es una matriz compleja $N \times M$, N 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

$$S = \underset{S \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} |Y - HS|^2 \tag{2}$$

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

$$H = QR \tag{3}$$

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

$$S = \underset{S \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} |Y - HS|^2 \tag{4}$$

Multiplicando por Q^T

Considerando $Q^T Y = Y$

$$SM \times 1 = \underset{S \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} |Y - RS|^2 \tag{5}$$

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 encontrar la distancia entre dos puntos (Artez et al., 2003; Barbero & Thompson, 2006; Ben Othma & Ouertani, 2009):

$$d(s) = \underset{S \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} |Y - RS|^2 \tag{6}$$

Considerando un vector de símbolos a ser enviados:

$$S^i = [S_1, \dots, S_{M_t}]^T \tag{7}$$

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

$$d_i(s^i) = d_{i+1}(S^{i+1}) + e_i(s^i) \quad i = M_t, \dots, 1 \tag{8}$$

$$d_{M_t+1} = 0 \tag{9}$$

$e_i(s^i)$ es la subdistancia entre la señal recibida y la señal transmitida en el nivel i, representa los incrementos de distancia:

$$d_i(s^i) = d_{i+1}(s^{i+1}) + \left| \hat{Y}_i - \sum_{j=i+1}^{M_t} R_{ij} S_j - R_{ii} S_i \right| \tag{10}$$

De acuerdo a lo anterior, la descomposición QR transforma el problema de la detección de señal en MIMO 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 tendrá $M+1$ niveles, el nodo raíz se enumera en M y de allí cada nivel disminuye en 1 hasta llegar a 0, las hojas del árbol se encuentran en el nivel 0.

En este punto, dado que el problema de la detección se puede modelar como un grafo, son aplicables los conceptos de Algoritmos de Colonias de Hormigas para explorar su solución, considerando la ecuación 10 como la función de evaluación del ACH.

2.3 Aplicación de ach a la detección en mimo

A continuación se presenta el análisis de la detección en un sistema MIMO utilizando el Algoritmo de Colonias de Hormigas original "Ant System" (Dorigo & Stützle, 2004).

2.3.1 El problema

La detección de los símbolos que fueron transmitidos y recibidos por múltiples antenas a partir de un conjunto de símbolos, en el receptor de un sistema MIMO punto a punto 2×2 y 4×4 .

2.3.2 Representación del problema como un grafo

Se considera un sistema MIMO 2×2 con canal Rayleigh invariable en el tiempo, conocimiento perfecto del canal, desvanecimiento plano, y modulación QPSK. Como el sistema es 2×2 la variable $M = 2$, entonces el árbol tendrá 3 niveles. La modulación empleada utiliza dos bits ($M_c = 2$) para transmitir la información, los símbolos QPSK son: $1+j$, $1-j$, $-1+j$ y $-1-j$, por lo tanto cada nodo tendrá 2^2 hijos, el árbol correspondiente a este problema se representa en la figura 3.

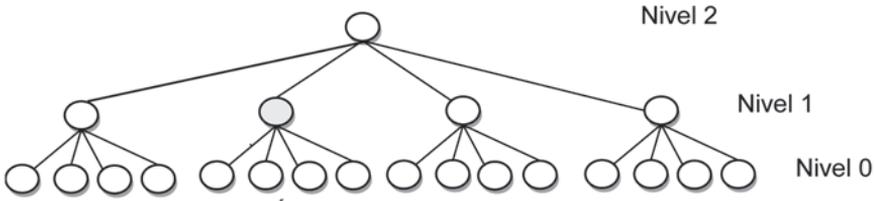


Figura 3. Árbol de búsqueda para un sistema 2X2 QPSK

Considerando el sistema MIMO 4X4, el grafo correspondiente se representa en la figura 4.

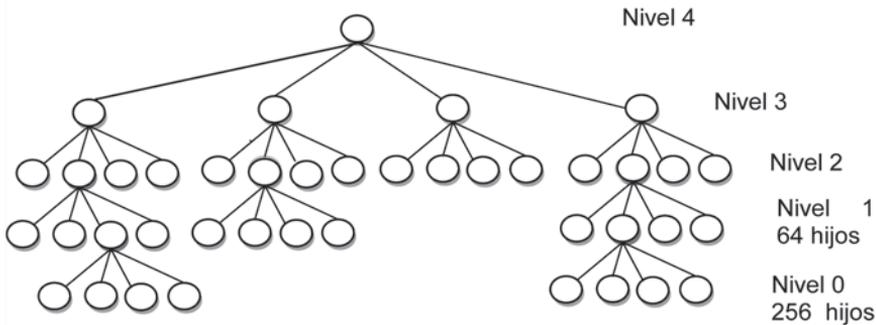


Figura 4. Árbol de búsqueda para un sistema 4X4 QPSK

La figura 3 se diferencia de la figura 4 en el número de niveles del árbol, dado que el número de hijos de cada nodo permanece constante ya que la modulación empleada es la misma.

2.3.3 Restricciones del problema

Las hormigas solo pueden visitar una vez un nodo y el algoritmo debe tener baja complejidad computacional y desempeño cercano al óptimo.

2.3.4 Información de los trayectos de feromona

Los trayectos de feromona representan la deseabilidad de un nodo de acuerdo a la función de evaluación del algoritmo de colonias de hormigas.

2.3.5 Inicialización del algoritmo

Para calcular la función de evaluación del algoritmo se realiza la descomposición de QR de H. Posteriormente se explora el árbol del problema completamente, por lo tanto se calculan todas las distancias n_{ij} para los nodos del grafo empleando la ecuación 11.

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (11)$$

d_{ij} se calcula utilizando la ecuación 10. Es importante determinar el valor inicial de la constante asociada a la feromona y también determinar el número de hormigas que se utilizarán (A), de resultados experimentales $t = 0.1$ y $A = 25$ (Dorigo & Stützle, 2004).

El pseudocódigo empleado para realizar el cálculo de la función de evaluación, se presenta en la figura 5.

```

% 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 (las distancias)
    Calcular FuncionEvaluacion();
    Calcular n ();
  Fin
Fin

```

Figura 5. Pseudocódigo para el cálculo de las distancias

La función Calcular Función Evaluación realiza el cálculo de la ecuación 10 y la función calcular Distancia desarrolla la ecuación 11.

2.3.6 Construcción de la solución

Consiste en moverse por el árbol buscando el símbolo que se envió. En cada nodo debe determinarse el próximo movimiento, esto se realiza calculando la probabilidad de transición presentada en la ecuación 12.

$$\Delta\rho_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha n_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} n_{il}^\beta \tau_{il}^\alpha} & \text{si } j \text{ pertenece a } K \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (12)$$

El valor de τ se ha iniciado en un valor en la fase anterior, este se va actualizando en cada paso de la construcción, α y β son los parámetros que controlan la importancia relativa de la feromona y la información asociada al problema.

De trabajos experimentales $\alpha = 1$ y $2 < \beta < 5$ y (Dorigo & Stützle, 2004). El pseudocódigo empleado para realizar la construcción de la solución, se presenta en la figura 6.

```

% Ciclo por cada hormiga
Para k = 1 hasta A
% 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

    P =  $\rho_{i1}^k$ 
    % Se comparan los valores de probabilidad de transición
    Para j = 1 hasta Mc
      Si P ≤ pij
        % Se asigna al símbolo detectado en el nivel i,
        % el de menor probabilidad
        Sik = Sj
        terminar
      Sino
        P = pij
    Fin
  Fin
  % Se actualiza la feromona
  Actualizar feromona();
Fin
SímboloEnviado = S.

```

Figura 6. Pseudocódigo para la construcción de la solución

La función calcular Probabilidad realiza las operaciones de la ecuación 12.

2.3.7 Actualización de la feromona

Permite 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 expresión:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in L \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{L_Q} & \text{si la hormiga } k \text{ usa el borde } (i, j) \text{ en su ruta} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (15)$$

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

L_Q es el trayecto seguido por la hormiga. El pseudocódigo empleado para realizar la actualización de la feromona, se presenta en la figura 7.

```

% 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 = Actualizar Feromona()
Fin funcion

```

Figura 7. Pseudocódigo para la actualización de la feromona

La función Calcular Ruta determina los nodos por los cuales se ha movido la hormiga, la función Calcular Delta realiza las operaciones de la ecuación 15, y la función Actualizar Feromona ejecuta los cálculos de la ecuación 14.

2.3.8 Análisis de resultados

En esta parte se analizan los resultados del algoritmo, que deben corresponder con el vector de símbolos enviado desde el transmisor, para ello se realizan cálculos de los valores de la BER en función de E_b/N_0 .

3. CONCLUSIONES

Se planteó la utilización de una metaheurística para resolver el

problema de la detección de señal en un sistema MIMO; con el análisis desarrollado hasta el momento se puede concluir que el problema puede modelarse siguiendo los lineamientos de los Algoritmos de Colonias de Hormigas. También se propone un diseño de la solución, donde se tienen en cuenta diferentes variables del Algoritmo de Colonias de Hormigas, que serán determinadas experimentalmente cuando el código se implemente en Matlab ®.

El Sistema MIMO 2X2 y 4X4 implementado hasta el momento, utiliza algoritmos de detección óptimos y subóptimos, y ha brindado resultados comparables a los disponibles en la literatura del tema. En la siguiente etapa se implementará el detector basado en Algoritmos de Colonias de Hormigas sobre Matlab®, y se espera alcanzar un desempeño cercano al del detector óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

- 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, pág. 2808-2820.
- Barbero, L. & Thompson, J. (2006). ***Rapid Prototyping of MIMO Algorithms for OFDM WLAN***. IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey.
- Ben Othma, G., & Ouertani, R. (2008). ***Hard and Soft Spherical Bound Stack Decoder for MIMO Systems***. ArXiv, Article No. 0811.1000. Accedido el 15 Mayo de 2009 en <http://arxiv.org/abs/0811.1000>.
- Bolcskei, H., Gesbert, D. et al. (2005). ***Space-Time Wireless Systems: From Array Processing to MIMO Communications***. Cambridge University Press.
- Darquennes, D. (2005). ***Implementation and Applications of Ant Colony Algorithms***. M.Sc. Tesis, University of Namur, Belgium.

- Dorigo, M. & Stutzle, T. (2006). ***“The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances”***. En Handbook of Metaheuristics, volumen 57, Ed. Springer New York, pág. 250-285.
- Dorigo, M., & Stützle T. (2004). ***Ant Colony Optimization***. Bradford Books.
- Dorigo, M., Di Caro, G. & Gambardella, L. (1999). ***“Ant Algorithms for Discrete Optimization”***. Artificial Life, vol. 5, no. 2, pág 137 - 172.
- Duarte, A. (2007). ***“Panorámica de los Procedimientos Metaheurísticos”***. En Seminario Sobre Sistemas Inteligentes, pág. 331-341.
- Foschini G., & Gans, M. (1998). ***“On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas”***. Wireless Personal Communications, vol. 6, no. 3, pág. 311–335.
- Foschini, G. (1996). ***“Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multi-element Antennas”***. Bell Labs Technical Journal, vol. 1, pág. 41-59.
- 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, pág. 281-302.
- Khan, A., Naeem, M., & Shah, S. (2007). ***“Binary Ant Colony Algorithm for Symbol Detection in a Spatial Multiplexing System”***. En Unconventional Computation, Ed Springer Berlin, pág. 115-126.
- Krzysztof, S. & Dorigo D, M. (2008). ***“Ant Colony Optimization for Continuous Domains”***. European Journal of Operational Research, vol. 185, no 3, pág. 1155-1173.
- Larsson, E. (2009). ***“MIMO Detection Methods: How They Work”***. IEEE signal processing magazine, pa91-95.
- Marti, R. (2009). ***“Procedimientos Metaheurísticos en***

Optimización Combinatoria". *Mathematiques*, vo. 1, no. 1, 2003. Accedido el 15 de Abril de 2009 en <http://www.revicien.net/>.

- Molisch, A. (2005). **Wireless Communications**. Wiley-IEEE Press.
- Oestges, C. & Clerckx, B. (2007). **MIMO wireless communications**. Elseiver.
- Pantrigo, J. (2005). **“Resolución de Problemas de Optimización Dinámica mediante la Hibridación entre Filtros de Partículas y Metaheurísticas Poblacionales”**. Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos.
- Singh, G. et al., (2005). **“Ant Colony Algorithms for Steiner Trees: an Application to Routing in Sensor Networks”**. En *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Ed. Idea Group Publishing, pág. 181-206.
- Telatar, E. (1999). **“Capacity of multiantenna Gaussian channels”**. *European Transactions on Telecommunications*, vol. 10, no. 6, pág. 585-595
- Waters, D., & Barry, J. (2008). **“The Chase Family of Detection Algorithms for Multiple-Input Multiple-Output Channels”**. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 2, pág. 739-747.