


# Búsqueda Tabú aplicada a detección de símbolos en L-MIMO \*

## Guefry Leider Agredo-Méndez

PhD(c) en Ciencias de la Electrónica. Docente Titular Departamento de Telecomunicaciones. Grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.  
 gagredo@unicauca.edu.co  <https://orcid.org/0000-0001-7983-9113>

## Pablo Emilio Jojoa-Gómez

PhD en Ingeniería Eléctrica. Docente Titular Departamento de Telecomunicaciones. Grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.  
 pjojoa@unicauca.edu.co

## Vicenç Almenar Terré

PhD en Telecomunicaciones Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Docente Titular Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia – ITEAM. Grupo de Integración de Sistemas Electrónicos Digitales – GISED. Universidad Politécnica de Valencia-España  
 valmenar@dcom.upv.es

## RESUMEN

En la detección de símbolos para sistemas MIMO con un gran número de antenas que se conoce como L-MIMO (Large MIMO), se busca contar con esquemas eficientes cuya complejidad haga viable su implementación real. Este artículo presenta los resultados obtenidos con un esquema basado en Tabu Search, comparándolo mediante simulación con detectores lineales de referencia, demostrando que, en condiciones normales de un canal inalámbrico, es posible obtener un mejor desempeño en las evaluaciones que se realizan hasta L-MIMO. 32x32

## PALABRAS CLAVE

5G, MIMO de Gran Escala, L-MIMO, Búsqueda Tabú, Comunicaciones Inalámbricas

## Tabu Search applied to symbol detection in L-MIMO

## ABSTRACT

In the detection of symbols for MIMO systems with a large number of antennas which is known as L-MIMO (Large MIMO), it is sought to have efficient schemes whose complexity makes viable its real implementation. This article presents the results obtained with a Tabu Search based scheme, comparing it by means of simulation with reference linear detectors, demonstrating that in normal conditions of a wireless channel, it is possible to obtain a better performance in evaluations that are made up to L-MIMO 32x32.

## KEYWORDS

5G, Large MIMO, L-MIMO, Tabu Search, Wireless Communications.

Recibido: 23/02/2017 Aceptado: 30/04/2017

\* <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n2.26213> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Cómo citar este artículo: AGREDO-MÉNDEZ, Guefry Leider; JOJOA-GÓMEZ, Pablo Emilio; ALMENAR TERRÉ, Vicenç. Búsqueda Tabú aplicada a detección de símbolos en L-MIMO. *En*: Entramado. Julio - Diciembre, 2017. vol. 13, no. 2, p. 278-284 <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n2.26213>



## Taboo de pesquisa aplicado à detecção de símbolos no L-MIMO

### R E S U M O

Na detecção de símbolos para sistemas MIMO com um grande número de antenas conhecidas como L-MIMO (MIMO grande), o objetivo é ter esquemas eficientes cuja complexidade torna sua implementação real viável. Este artigo apresenta os resultados obtidos com um esquema baseado em Tabu Search, comparando-o por simulação com detectores de referência linear, demonstrando que, em condições normais de um canal sem fio, é possível obter um melhor desempenho nas avaliações que são feitas para L-MIMO 32x32

### PALAVRAS-CHAVE

LSG, MIMO de grande escala, L-MIMO, Tabu Search, Wireless Communications

### Introducción

Las demandas de capacidad en las redes móviles motivadas por la masificación en el uso de dispositivos móviles como laptops, tablets y smartphones y el auge de lo que se ha denominado el Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) ha conminado a la búsqueda de soluciones tecnológicas que puedan hacerles frente a estas necesidades, las cuales se han recogido en lo que ahora se conoce como la quinta generación móvil o 5G (Andrews, y otros, 2014). Particularmente una de estas soluciones es el uso de un gran número de antenas en la estación base atendiendo un gran número de dispositivos (ya no se habla de atender usuarios, pues, uno solo podría tener una gran cantidad de dispositivos como un smartphone, una tablet, un laptop, un smartwatch, entre otros) a lo que en la literatura se conoce como MIMO extenso (L-MIMO, Large MIMO) o MIMO Masivo (M-MIMO, Massive MIMO) (Marzetta, 2015) (Larsson, Edfors, Tufvesson, & Marzetta, 2014) en general asociándose a arreglos que usen NT, antenas transmisoras por NR antenas receptoras en configuraciones de NT x NR pudiendo ser 16 x 16, 32 x 32, 64 x 64 o superior. Con esta clase de arreglos las tecnologías inalámbricas consiguen diversos tipos de beneficios (Rusek, y otros, 2013) como el aumento en la capacidad y la velocidad, disminución de la energía consumida por antena pudiendo enmarcarse en las actualmente denominadas “Comunicaciones Verdes” y mayor tolerancia a fallas por la alta redundancia del sistema, al contar con más elementos, pero por otra parte el proceso que se realiza en el receptor para detectar los símbolos que llevan la información por el medio inalámbrico se torna extremadamente complejo y al seguir los esquemas tradicionales de alto desempeño de los sistemas MIMO de bajo orden se generan tiempos de ejecución demasiado elevados que hacen inviable su implementación práctica, pues, no atienden con efectividad la demanda de un procesamiento de señal rápido que permita aprovechar los beneficios conseguidos con el elevado número de antenas.

Esta problemática es la que se aborda en el presente artículo, que muestra los resultados de aplicar un algoritmo

basado en la metaheurística de la Búsqueda Tabú (TS, Tabu Search) a la detección de Símbolos en L-MIMO para el diseño de un esquema de detección L-MIMO.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se explican las técnicas de detección escogidas como referencia para efectos de comparación, en la sección 3 se introduce la Búsqueda Tabú como la base del Esquema de Detección propuesto, en la sección 4 se explican los métodos utilizados para efectos de evaluación comparativa y en la sección 5 se presentan los resultados obtenidos, finalizando con las conclusiones y trabajos futuros.

### I. Técnicas de detección en MIMO de referencia

Se considera el modelo de canal MIMO con desvanecimiento plano de Rayleigh (flat Rayleigh fading) con NT antenas transmisoras x NR antenas receptoras como:

$$y = Hx + n \quad (1)$$

donde  $y, n, \in \mathbb{C}^{NR}$ ,  $H \in \mathbb{C}^{NR \times NT}$ ,  $\in \mathbb{S}^{NT}$ ,  $\mathbb{C}$  denota el conjunto de número complejos y  $\mathbb{S}$  denota el conjunto de puntos de constelación de la modulación. La cardinalidad de  $\mathbb{S}$  que se denota como  $|\mathbb{S}|$  es contable finita. El vector de símbolos transmitidos es  $x = [x_1, \dots, x_{NT}]^T$  y el vector de símbolos recibidos es  $y = [y_1, \dots, y_{NR}]^T$ . Se asume que los vectores de símbolos en  $x$  son aleatorios no correlacionados con media cero y matriz de covarianza  $\sigma_x^2 I$ , donde  $I$  es la matriz identidad. Los vectores de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise)  $n = [n_1, \dots, n_{NR}]^T$  son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d) con media cero y matriz de covarianza  $\sigma_n^2 I$ . La matriz del canal de valores complejos tiene entradas gaussianas i.i.d con media zero y varianza unitaria y se asume que es perfectamente conocida en el receptor.

En las siguientes sub-secciones se describen brevemente las técnicas de detección MIMO que sirvieron como referencia para este trabajo. La detección de máxima verosimilitud

(ML, Maximum Likelihood) logra el desempeño óptimo; sin embargo, sufre de incrementos exponenciales de la complejidad computacional, de tal forma que, si en sistemas prácticos MIMO se hace inviable, lo es más aún para sistemas L-MIMO. Por su parte, las técnicas de detección de cero forzado (ZF, Zero Forcing) y mínimo error cuadrático medio (MMSE, Minimum Mean Square Error) son métodos lineales basados en ecualización (Cho, Kim, Yang, & Kang, 2010) que aunque tienen un menor desempeño logran bajar la complejidad.

### 2.1. Técnica de detección de máxima verosimilitud

La expresión para el detector de máxima verosimilitud referido con la sigla ML es (Cho, Kim, Yang, & Kang, 2010):

$$\hat{x}_{ML} = \underset{x \in \mathbb{S}^{N_T}}{\operatorname{argmin}} \|y - Hx\|^2 \quad (2)$$

La detección ML calcula la mínima distancia *euclidiana* entre el vector de señal recibido y el producto de todos los posibles vectores de señal transmitidos con el canal  $H$  y encuentra el que tenga la mínima distancia. Al obtener la solución que satisface a (2) en el conjunto  $\mathbb{S}^{N_T}$  el problema es la enorme cardinalidad de  $\mathbb{S}^{N_T}$  que crece exponencialmente en la medida que aumenta  $N_T$  y el orden de la modulación (Kim, Kim, & Kim, 2007) lo cual le hace inviable para su uso práctico en MIMO y más aún para L-MIMO y aunque se tienen detectores que se aproximan al desempeño de ML como el detector esférico (SD, *Sphere Detector*) la complejidad computacional que revisten cuando se tienen sistemas como los de L-MIMO es demasiado elevada (Rusek, y otros, 2013), de tal forma que se evitan en las simulaciones por no ser práctico su uso, ni siquiera en variantes de menor complejidad como en el caso del detector esférico de complejidad fija (FCSD, *Fixed Complexity Sphere Decoder*) Existen otros detectores, conocidos como detectores sub-óptimos, que tienen un desempeño en cuanto BER menor que ML, pero el tiempo que emplean para la detección es mucho menor; además se pueden implementar en la práctica ya que no requieren de demasiada capacidad computacional, de estos como referentes para comparación de desempeño, se han tomado a los detectores lineales que se tratan a continuación:

### 2.2 Técnica de detección ZF

Parte del conocimiento de la matriz del canal  $H$  para eliminar la interferencia que las otras señales transmitidas causan sobre la señal recibida, luego compara los símbolos de la señal recibida con los de la constelación, cabe resaltar que ZF no elimina los componentes de ruido que afectan a la señal.

La detección ZF multiplica el vector de símbolos recibidos por una matriz de ecualización  $W$ , en la forma  $\hat{x}_{ZF} = W_{ZF} \times y$ . La ecualización ZF se deriva de la pseudo-inversa de Moore-Penrouse (Golub & Loan, 1996) de  $H$ ,

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (3)$$

Donde  $(\cdot)^{-1}$  y  $(\cdot)^H$  corresponden a la matriz inversa y a la hermitiana respectivamente. Luego de la ecualización el vector estimado de símbolos transmitido  $\hat{x}_{ZF}$  por un detector ZF es:

$$\hat{x}_{ZF} = W_{ZF} y = (H^H H)^{-1} H^H y = x + \hat{n} \quad (4)$$

donde  $\hat{n} = (H^H H)^{-1} H^H n$  perturba al vector de símbolos transmitidos  $x$ . De (4) se remueve la diafonía de  $x$  generada por el canal  $H$  en la que se recibe, como si se invirtiera el efecto del canal.

### 2.3 Técnica de detección MMSE

La detección MMSE minimiza conjuntamente tanto la interferencia como el ruido, mientras que ZF solo remueve los de la interferencia. Podría decirse que busca el equilibrio entre la cancelación de la interferencia y la reducción del realce del ruido. Esto implica que se minimiza el error cuadrático medio entre los símbolos transmitidos y los estimados del receptor. Por tanto, MMSE es mejor que ZF en presencia de ruido.

El concepto que el detector MMSE utiliza es minimizar el error cuadrático medio  $E(\|W y - x\|^2)$ , donde  $E(\cdot)$  denota la esperanza de la variable aleatoria. La detección MMSE considera la varianza del ruido y reduce su realce usando una matriz de ecualización de error cuadrático medio mínimo, para despejar se necesita encontrar una matriz de ponderación que satisfaga la cual viene dada por (Kay, 1993):

$$W_{MMSE} = (H^H H + (\sigma_n^2 / \sigma_x^2) I)^{-1} H^H \quad (5)$$

El vector estimado de símbolos transmitidos  $\hat{x}_{MMSE}$  en la detección MMSE es

$$\hat{x}_{MMSE} = W_{MMSE} y = (H^H H + (\sigma_n^2 / \sigma_x^2) I)^{-1} H^H y \quad (6)$$

Los resultados de los detectores ZF y MMSE, es decir,  $\hat{x}_{ZF}$  y  $\hat{x}_{MMSE}$  no son necesariamente puntos propios de la constelación  $\mathbb{S}$  en por lo que se deben aproximar o redondear al símbolo de constelación más cercano.

### 2.4 Técnicas ZF y MMSE con SIC

Los métodos de detección lineales presentan una baja complejidad en cuanto a su implementación en hardware. Su

desempeño se puede mejorar con un aumento relativamente leve en su complejidad mediante la cancelación sucesiva de interferencias (SIC, *Successive Interference Cancellation*). Así se tiene un banco de receptores lineales, donde cada uno detecta a uno de los flujos de datos paralelos, cancelando sucesivamente las componentes de señal detectadas a partir de la señal recibida en cada etapa.

De esta forma, los receptores en SIC identifican qué antena de transmisión tuvo el mejor canal y tratan de detectar el símbolo enviado por esa antena. Una vez detectado, ese símbolo se resta de la información recibida en otras antenas. Cuando se aplica SIC, el orden de la detección es muy importante para el desempeño del sistema de detección. Existen varios métodos para determinar el orden de detección (Cho, Kim, Yang, & Kang, 2010), uno muy aceptado utiliza la matriz de covarianza del error de estimación, pues, los procesos de anulación y cancelación pueden provocar propagación de errores: si  $x_1$  se estima inadecuadamente puede producir errores importantes en la estimación de los aún desconocidos  $x_2, x_3, \dots$ . Para reducir los efectos de esta posible propagación, se trabaja como se propuso en V-BLAST (Wolniansky, Foschini, Golden, & Valenzuela, 1998), yendo desde la señal más “fuerte” a la más “débil”.

La técnica ZF-SIC básicamente consta de los siguientes tres pasos recursivos:

- Ordenamiento: se determina el flujo transmitido con la menor varianza de error para establecer un orden.
- Anulación de interferencia: se estima la señal transmitida más fuerte anulando todas las señales débiles.
- Cancelación de interferencia: se extraen los bits de datos, se resta su contribución del vector de señal recibido y se retorna a la etapa de ordenamiento.

Para el caso de MMSE-SIC (Lui & Liu, 2008) se decide sobre la componente con la diagonal más pequeña en la matriz de covarianza en (6) y se remueve su efecto en el canal de salida y luego de cada iteración se actualiza el vector recibido. El algoritmo de MMSE-SIC básicamente consta de tres pasos en forma similar a ZF:

- Calcular la matriz buscando la entrada de diagonal  $j$ -ésima más pequeña. Permutar la columna  $j$ -ésima para que sea última columna y permutar las filas de en consecuencia.
- A partir de la estimación determinar los elementos detectados .
- Si aún quedan flujos de estimación por procesar se regresa al paso 1.

### 3. Técnica de detección ZF-TS

Como se ha explicado anteriormente la detección Large MIMO se considera viable a partir del uso de detectores rápidos como son los lineales ZF y MMSE y especialmente sus modos SIC explicados en la sección anterior. De la revisión del estado del (arte particularmente de Rusek, y otros, 2013), (Datta, Srinidhi, Chockalingam, & Sundar Rajan, 2010) y (Chockalingam, 2010) se estableció que una metaheurística como la Búsqueda Tabú (Glover, 1989) podría ser efectiva para atender este tipo de problema. El reto fue entonces hacer su aplicación a la detección de símbolos en Large MIMO, lo que requirió el esfuerzo para concebir cómo poder utilizarla en este proceso, para lo cual fue necesario entenderla, realizar su abstracción y aprender cómo llevarla a una implementación en un programa computacional que permitiera hacer la comparación con las técnicas referentes por medio de simulación para obtener resultados y poder realizar el análisis. Fue necesario trabajar con simulación ante la alta complejidad de una implementación real de la tecnología Large MIMO, especialmente en el nivel físico, de por sí con arreglos de tan alto número de antenas, ya que las simulaciones conllevaron un tiempo bastante considerable.

Un aspecto clave fue que una vez entendido el funcionamiento de TS y el proceso de detección de símbolos en Large MIMO se pudo identificar que para la aplicación de esta metaheurística era estratégico definir el primer elemento o solución con el que iba a iniciar el algoritmo, pues, de lo contrario podría conllevar a necesitar un tiempo considerable para el procesamiento, o no ofrecer un desempeño apropiado. Por lo anterior y considerando que el éxito de la propuesta del Esquema de Detección estaba en: tener un mejor desempeño en un tiempo similar o tener un desempeño similar, pero en un tiempo mejor, frente al mejor detector de referencia, así que se trabajó con la base de usar el resultado de ZF como primera entrada en el algoritmo.

De esta forma, el esquema de detección se diseñó como un esquema híbrido que se inicia con la entrada a partir del resultado de ZF y luego se procede con TS al momento de la detección. Se parte de considerar que los símbolos son equiprobables por lo que TS no se utiliza para buscar primero el símbolo con más probabilidad, sino que con TS lo que se hace es definir una distancia mínima y en caso de que el símbolo recibido se separe del símbolo original por una distancia menor se detiene en ese punto el proceso de detección; la característica de memoria de TS como lista tabú se aplica al definir la distancia mínima, ya que si se han presentado errores el valor de esta distancia disminuye. Por lo anterior a este esquema se le ha denominado ZF-TS, como se verá en los resultados de las simulaciones realizadas para efectos comparativos.

### 4. Métodos

Para efectos de evaluación comparativa del desempeño de las técnicas de detección y la complejidad computacional de las mismas, se trabajó con Matlab® r2015a haciendo uso del *Communications System Toolbox* en un equipo con 8 GB de RAM y procesador Intel® core i7; como este procesador tiene cuatro núcleos se aprovecharon los beneficios del *Parallel Computing Toolbox* de Matlab que permite hacer uso de procesadores multicore, GPUs y clústers de computadores (The MathWorks, Inc., 2015) para llevar a cabo simulaciones extensas en un menor tiempo.

En este trabajo se consignan los resultados con modulación 4QAM, dado que el interés del trabajo fue comparar el desempeño de algoritmos de diversas técnicas de detección en MIMO y especialmente en L-MIMO, el uso de este toolbox de computación paralela aceleró la obtención de resultados, y aunque los valores puntuales seguramente cambiarán en implementaciones reales por la diferencia en las estructuras de datos y el manejo del agendamiento de procesos, entre otros, la tendencia en el desempeño de los algoritmos que permite proyectar el orden en que mejor realizan la detección, se debería mantener.

Se recurre a Matlab® para obtención de resultados por medio de simulación, ante la alta complejidad de una implementación real de la tecnología Large MIMO, especialmente en el nivel físico, de tal forma que no sería sencillo trabajarla en dispositivos como los Periféricos Universales de Radio por Software (USRP, *Universal Software Radio Peripherals*).

Para las simulaciones, particularmente para los detectores lineales de referencia ZF y MMSE normales y con SIC que se tomaron para comparación de desempeño y complejidad, se consideró el ejemplo de multiplexación espacial MIMO que trae el *Communications System Toolbox* de Matlab® (The MathWorks, Inc., 2014) y se soportó en el trabajo de Céspedes, Olmos, Sánchez-Fernández, & Perez-Cruz, 2014, contemplando el modelo de canal MIMO en la misma forma que se estableció en este artículo pero trabajando con modulación 4QAM para efectos de evaluación comparativa con TS y las técnicas de detección lineales y sus modos SIC presentadas con su respectiva fundamentación matemática de la sección 2. Para la comparación con varios arreglos de antenas L-MIMO se realizaron simulaciones para obtener los resultados que se aprecian en la sección 5, por ello se trabajaron las configuraciones de la Tabla 1.

La configuración No 1 es la única en la que se ha trabajado ML dada su alta complejidad computacional, la cual se refleja en la gran cantidad de tiempo que toma su procesamiento.

Tabla 1. Configuraciones de simulación

No	Técnicas de Detección	L-MIMO
1	ML, ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC, ZF-TS	8 x 8
2	ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC, ZF-TS	16 x 16
3	ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC, ZF-TS	32 x 32

Fuente: Los Autores

### 5. Resultados

En esta sección se detallan los resultados de cada una de las configuraciones de la Tabla 1. Las Figuras 1, 2, 3 y 4 presentan la relación SER vs SNR que es la comparación de desempeño de los detectores y solamente para la primera configuración con fines de evidenciar lo que demanda el procesamiento de ML se presenta su tiempo de cómputo.

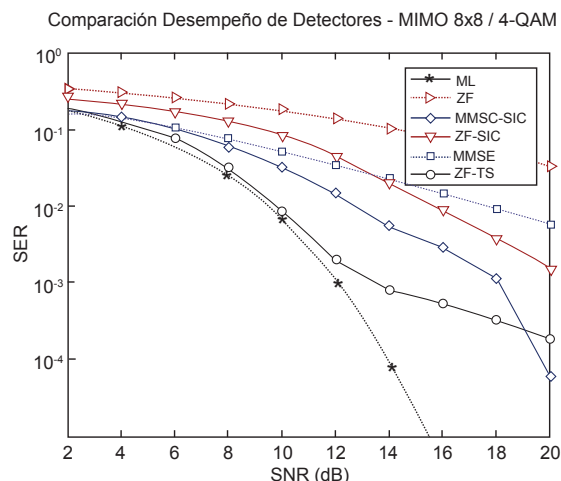


Figura 1. Comparación de desempeño de detectores en 8x8. Fuente: Los Autores.

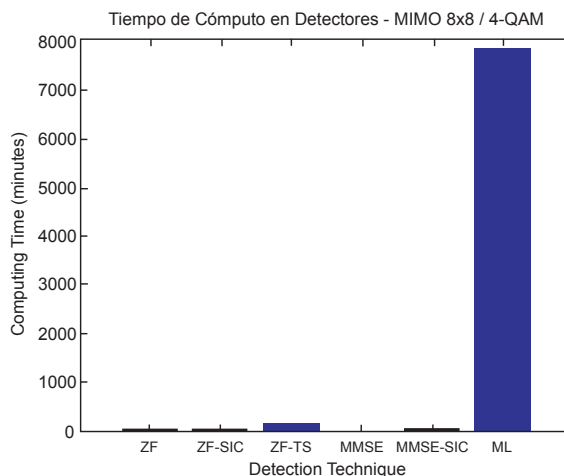


Figura 2. Comparación del Tiempo de Cómputo de Detectores en 8x8. Fuente: Los Autores.

Como se hace evidente, el Esquema de Detección propuesto ZF-TS logra un mejor desempeño que el mejor detector lineal referente MMSE-SIC y lo hace especialmente mejor en relaciones señal a ruido SNR bajas, siguiendo casi a la par a ML en estas situaciones que es normal encontrar en comunicaciones inalámbricas, pero el tiempo de cómputo necesitado por ZF-TS es notoriamente mucho menor que el de ML y de orden similar a los demás detectores.

Es evidente por tanto la alta complejidad que reviste la técnica de detección basada en ML, la cual con apenas una configuración MIMO 8x8 requirió prácticamente 8 veces más tiempo que ZF-TS que en este nivel fue la técnica siguiente que más tiempo demandó. Para las configuraciones de 16x16 y 32x32 no se simuló con ML porque el tiempo para obtención de resultados lo hacía prohibitivo.

Como se puede apreciar en las Figuras 3 y 4, en órdenes de Large MIMO propiamente dicho el Esquema de Detección propuesto ZF-TS mantuvo su mejor desempeño frente a MMSE-SIC.

### 6. Conclusiones

A partir de los resultados se puede concluir que la aplicación de la Búsqueda Tabú en los escenarios señalados presenta un mejor desempeño para realizar la detección de símbolos que los detectores lineales de referencia, manteniéndose en el orden de tiempo de cómputo de los mismos.

En los órdenes altos de L-MIMO el tiempo de procesamiento de la detección basada en TS puede ajustarse a partir de la cantidad de elementos como la cantidad de iteraciones y el tamaño de la lista tabú para encontrar un balance entre desempeño y costo computacional y para una implementación real se puede soportar en las capacidades de procesamiento *multicore* o con GPUs de los actuales dispositivos móviles, que como ocurrió para el caso de las simulaciones realizadas en este proyecto, el procesamiento en paralelo ha facilitado acelerar la obtención de resultados, pues el procesamiento era demasiado elevado y con varios esquemas y configuraciones para evaluar.

La búsqueda de opciones para solventar la complejidad en ambientes L-MIMO donde se usa un gran número de antenas, es viable, para lo que se requiere considerar formas que hagan eficientes el procesamiento computacional y lleve a la práctica sus beneficios.

En configuraciones de bajo orden en la relación desempeño-complejidad los detectores tradicionales pueden seguir teniendo éxito, por lo que, así como en los sistemas inalámbricos actuales, el esquema de modulación y codificación es adaptativo (*AMC, Adaptive Modulation and Coding*) en función de la tasa de error, seguramente los sistemas L-MIMO que se implementen tendrán un esquema de detección MIMO adaptativo en función del orden del arreglo de antenas que se trabaje. El sistema requerirá de suficiente flexibilidad para atender las demandas de los dispositivos de los usuarios, y reconfigurarse ante factores como la cantidad de antenas que los atiendan y la SNR, entre otros.

Trabajos futuros podrían evaluar el desempeño de las variaciones que tiene la Búsqueda Tabú o considerar la aplicación de otras metaheurísticas. Se puede también considerar estudiar la viabilidad de implementación de los algoritmos en plataformas distintas o en USRPs para verificar la concordancia de los resultados.

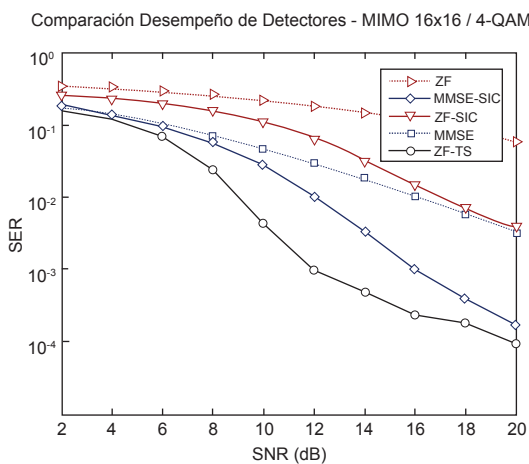


Figura 3. Comparación de desempeño de detectores en 16x16. Fuente: Los Autores.

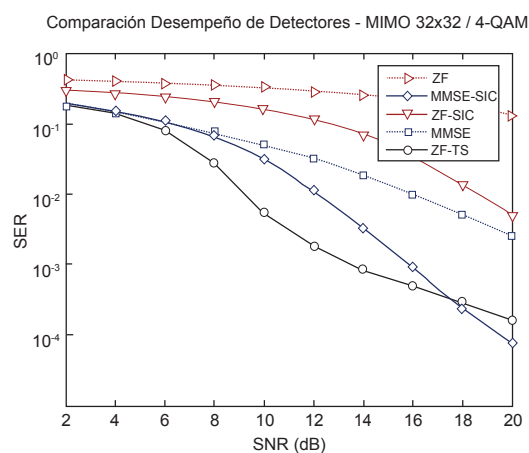


Figura 4. Comparación de desempeño de detectores en 32x32. Fuente: Los Autores.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca, Departamento de Telecomunicaciones, Grupo de Investigación Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones-GNTT y a la Universidad Politécnica de Valencia (España), Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia-iTEAM, Grupo de Integración de Sistemas Electrónicos Digitales-GISED, por el soporte para el desarrollo de este trabajo.

## Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias bibliográficas

1. ANDREWS, J., BUZZI, S., CHOI, W., HANLY, S., LOZANO, A., SOONG, A., & ZHANG, J. What Will 5G Be? *En: IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Junio, 2014. Vol. 32, no 6, p. 1065 - 1082.
2. CÉSPEDES, J., OLMOS, P., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, M., & PÉREZ-CRUZ, F. Expectation Propagation Detection for High-Order High-Dimensional MIMO Systems. *En: IEEE Transactions on Communications*. Agosto, 2014. vol 62, no. 8, p. 2840-2848.
3. CHO, Y. S., KIM, J., YANG, W. Y., & KANG, C. G. Signal Detection for Spatially Multiplexed MIMO Systems. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Singapore: John Wiley & Sons. 2010
4. CHOCKALINGAM, A. Detection, Low-Complexity Algorithms for Large-MIMO. *En: 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP) 2010*.
5. DATTA, T., SRINIDHI, N., CHOCKALINGAM, A., y SUNDAR, B. Random-Restart Reactive Tabu Search Algorithm for Detection in Large-MIMO Systems. *En: IEEE Communications Letters*. Octubre, 2010. vol. 14, no. 12, p. 1107-1109.
6. GLOVER, F. Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*. 1989. p. 190-206.
7. KIM, J., KIM, Y., & AND KIM, K. Computationally efficient signal detection method for next generation mobile communications using multiple antennas. *SK Telecommunication Review*. 2007. vol, 17 no. 1, p. 183-191.
8. LARSSON, E. G., EDFORS, O., TUFVESSON, F., & MARZETTA, T. L. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*. Febrero, 2014. vol, 52, no. 2, p. 186 - 195.
9. LUI, T., & LIU, Y. L. Modified fast recursive algorithm for efficient MMSE-SIC detection of the V-BLAST system. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Octubre, 2008. vol. 7, no. 10, p. 3713-3717.
10. MARZETTA, T. Massive MIMO: An Introduction. *Bell Labs Technical Journal*. Marzo, 2015. vol, 20, p. 11 - 22.
11. RUSEK, F., PERSSON, D., KIONG, B., LARSSON, E. G., MARZETTA, T. L., EDFORS, O., & TUFVESSON, F. Scaling Up MIMO. *IEEE Signal Processing*. Enero, 2013. vol, 30, no. 1, p. 40 - 60.
12. THE MATHWORKS, INC. (2015). Parallel Computing Toolbox. Obtenido de <http://es.mathworks.com/products/parallel-computing/>
13. THE MATHWORKS, INC. (2014). Spatial Multiplexing Example. Obtenido de <http://es.mathworks.com/help/comm/examples/spatial-multiplexing.html>
14. WOLNIANSKY, P. W., FOSCHINI, G. J., GOLDEN, G. D., & VALENZUELA, R. A. V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel. *ISSSE*. 1998. Pisa.