

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

## PERFORMANCE ANALYSIS OF THE PHYSICAL LEVEL OF A PEER TO PEER MIMO SYSTEM

**AUTOR**

CLAUDIA MILENA HERNÁNDEZ BONILLA  
Ingeniera en Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Docente Asistente  
Grupo de Nuevas Tecnologías en  
Telecomunicaciones GNTT  
claudiah@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**AUTOR**

PEDRO ALEJANDRO CAICEDO VALLEJO  
Estudiante Ingeniería en Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Grupo de Nuevas Tecnologías en  
Telecomunicaciones GNTT  
peacaicedo@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**AUTOR**

PABLO EMILIO JOJOA GOMEZ  
Doctor en Ingeniería Eléctrica  
\*Universidad del Cauca  
Docente Titular Universidad del  
Cauca  
Grupo Nuevas Tecnologías en  
Telecomunicaciones  
pjojoa@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**AUTOR**

GUSTAVO ADOLFO MEDINA PAZ  
Estudiante Ingeniería en  
Electrónica y Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Grupo de Nuevas Tecnologías en  
Telecomunicaciones GNTT  
gmedina@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**INSTITUCIÓN**

\*UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
UNICAUCA  
Universidad pública  
Carrera 2 con Calle 15 Norte  
Esquina, Sector Tulcán.  
Popayán, Cauca  
decafiet@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**RECEPCIÓN:** Enero 31 de 2011

**ACEPTACIÓN:** Marzo 18 de 2011

**TEMÁTICA:** Sistemas inalámbricos y móviles

**TIPO DE ARTÍCULO:** Artículo de investigación científica y tecnológica

**RESUMEN ANALÍTICO**

Los sistemas de comunicaciones de múltiples entradas y múltiples salidas son la base de las altas capacidades de los sistemas de comunicaciones de tercera y cuarta generación, es importante analizar las características de nivel físico de dichos sistemas y como la variación de sus parámetros influyen en el desempeño. En el entorno universitario, es necesario disponer de herramientas que permitan analizar el desempeño de los sistemas MIMO, en este trabajo se presenta el análisis y diseño a nivel físico de un sistema MIMO 2x2 y 4x4 con canal Rayleigh, con variaciones en el esquema de modulación y en los algoritmos de detección. El trabajo se desarrolla de acuerdo a una metodología específica para la simulación de sistemas de telecomunicaciones. El sistema se implementó en Matlab y se validó de acuerdo a trabajos previamente realizados, se configuraron diferentes escenarios sobre los cuales se comprobó que el desempeño del sistema MIMO depende del número de antenas en transmisión y en recepción, la modulación y el algoritmo de detección, consiguiéndose el mejor desempeño para el sistema MIMO 4x4 con modulación QPSK, con algoritmo de detección de máxima verosimilitud, pero con elevada complejidad computacional, seguido por el algoritmo esférico y finalmente los algoritmos subóptimos MMSE y ZF.

**PALABRAS CLAVES:** Sistemas MIMO, Desempeño del Nivel Físico, Algoritmos de detección Esquemas de multiplexación, Matlab.

**ANALYTICAL SUMMARY**

Communications systems of multiple inputs and multiple outputs are the basis of high capacity communications systems of third and fourth generation, it is important to analyze the physical characteristics of these systems and how the variation of the parameters affecting performance . In the university environment, it is necessary to have tools to analyze the performance of MIMO systems, this paper presents the analysis and design at the physical level of a 2x2 and 4x4 MIMO Rayleigh channel with variations in the modulation scheme and detection algorithms. The work is carried out according to a specific methodology for the simulation of telecommunication systems. The system was implemented in Matlab and validated according to work already performed, different scenarios were configured on which it was found that the MIMO system performance depends on the number of antennas in transmission and reception, modulation and detection algorithm achieving the best performance for the 4x4 MIMO system with QPSK modulation, detection algorithm with maximum likelihood, but with high computational complexity, followed by the algorithm and finally spherical suboptimal MMSE and ZF algorithms.

**KEYWORDS:** MIMO Systems, Physical Layer Performance, Detection Algorithms, Multiplexing schemes, Matlab.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las telecomunicaciones avanzan rápidamente, tan sólo un par de décadas atrás era difícil concebir que los servicios que se brindan en la actualidad serían creados, algunos de estos se ofrecen a través de dispositivos móviles, los cuales tienen gran aceptación en los usuarios del mundo. Sin embargo debido a la constante evolución se puede prever que los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos en poco tiempo se quedarán cortos debido al incremento de nuevos servicios con mayores exigencias en la comunicación; por ello se piensa en aplicaciones prácticas, que necesitan de mayores capacidades.

En dicha evolución, se considera que los sistemas MIMO serán la base de la cuarta generación de tecnologías en telecomunicaciones, estos 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 del sistema.

MIMO trabaja con dos tipos de esquemas, diversidad espacial y multiplexación espacial. El primero se destaca por aprovechar el multitrayecto ocasionado por las múltiples señales que llegan al receptor, multitrayecto que en sistemas inalámbricos tradicionales genera desvanecimiento de la señal original, mientras que en los sistemas MIMO este multitrayecto es aprovechado por las múltiples antenas en el receptor produciéndose redundancias de la señal original, las cuales contrarrestan los efectos generados por desvanecimientos en la señal.

El segundo, conocido con el nombre de multiplexación espacial, consiste en dividir entre el número de antenas usadas en el transmisor la cadena de símbolos a transmitir, convirtiéndolas en subcadenas de información que son enviadas simultáneamente desde las antenas transmisoras dentro de la misma banda de frecuencias. La señal al propagarse genera múltiples caminos, con lo cual cada antena receptora observa una superposición de las señales transmitidas. Las antenas transmisoras introducen una "firma" espacial a los datos con el fin que cada antena receptora pueda reconocer y recuperar la información que le pertenece, reconstruyendo las subcadenas que son multiplexadas para entregar los datos originales al destino, todo con el fin de maximizar la velocidad de transmisión. En los análisis realizados en este documento se implementó el esquema de multiplexación espacial.

Este artículo está organizado así: en la sección 1 se presenta la descripción del problema, en donde se describe las razones por las cuales se realizó este estudio. En la sección 2 se explica la descripción de la

simulación, ilustrando las características que presenta, la herramienta de simulación utilizada, el proceso de desarrollo implementado y la validación de resultados. La sección 3 contiene los resultados obtenidos con su respectivo análisis y en la sección 4 se presentan las conclusiones que dejó este estudio.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Pese a las bondades que ofrecen los sistemas MIMO, aún no se implementan de forma masiva debido a los inconvenientes que no permiten a los actuales proveedores incluirlos en sus redes. Uno de los principales problemas es la complejidad de implementación del sistema de recepción en el esquema de multiplexación espacial, en donde se utilizan distintos tipos de algoritmos de detección y se manejan elevados niveles de complejidad [II] [III] [IV].

Existen numerosas investigaciones encargadas de analizar el comportamiento de los algoritmos de detección empleados en el receptor, algoritmos que determinan el rendimiento de MIMO y cuya complejidad se incrementa considerablemente a medida que se aumenta la eficiencia del sistema [V] [VI].

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

El algoritmo de detección que ofrece los mejores resultados en un sistema MIMO, es el de máxima verosimilitud pero no es implementable en la práctica debido a su alta complejidad.

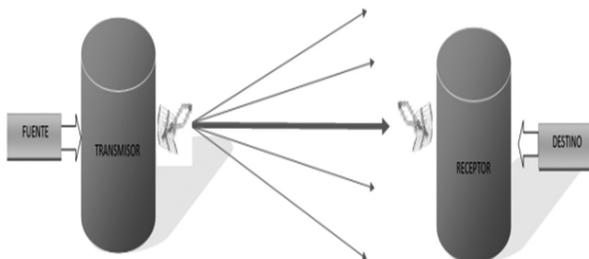
En este trabajo se analiza el desempeño de un sistema MIMO 2x2 y 4x4 punto a punto con multiplexación espacial, con modulaciones 16QAM y QPSK; canal AWGN con desvanecimiento plano; algoritmos de detección ML, ZF, MMSE y esférico con conocimiento perfecto del canal.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Los sistemas de telecomunicaciones de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), tienen diversos

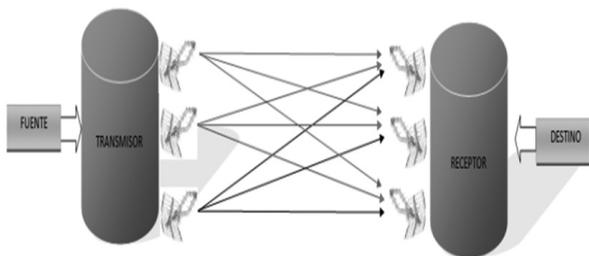
beneficios sobre los sistemas de una sola entrada y una sola salida (SISO), tanto que se considera que estos permitirán mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos de próxima generación.

**FIGURA 1.** Topología de un sistema SISO (Single input, single output)



Con la evolución de las redes de telecomunicaciones los servicios que se les brindan a los usuarios requieren capacidades de transmisión que superan ampliamente a las existentes, MIMO ofrece aumentar la capacidad del canal de transmisión, lo que ha captado la atención de varios centros de investigación a nivel mundial.

**FIGURA 2.** Topología de un sistema MIMO (Multiple input Multiple Output)



Es necesario disponer de análisis que permitan verificar el funcionamiento de dichos sistemas para apropiarse los conceptos asociados a estos y además generar nuevos espacios para la investigación de otros temas. A continuación se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta para desarrollar la simulación.

## 2.1 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para la escogencia de la herramienta de simulación se realizó un análisis de varias alternativas que brindan la posibilidad de simular sistemas inalámbricos. En el

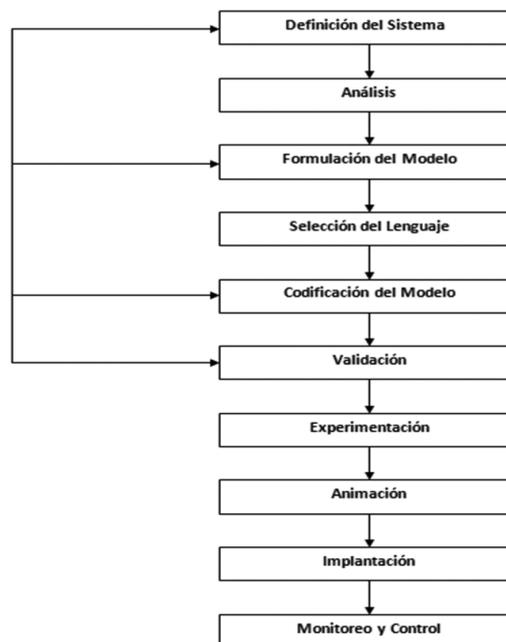
mercado existen varias herramientas de simulación pero la mayoría necesitan de una licencia para su manipulación. Entre las herramientas que se encontraron están: MATLAB 7.1, LabVIEW 7.0, NCTUns 3.0, NS2, y SCILAB 5.1.

Después de analizar las características y desventajas, se concluyó que MATLAB se acomoda más a las exigencias de este trabajo, considerando que los trabajos de investigación que se realizan a nivel mundial la emplean como herramienta fundamental.

## 2.2 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La Metodología empleada [VIII] para la creación y desarrollo de la simulación se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3, el cual se describe en los siguientes pasos:

**FIGURA 3.** Diagrama de Flujo del Proceso de Desarrollo de una Simulación



Se recomienda seguir esta metodología en el desarrollo de simulaciones de sistemas de telecomunicaciones. Aspectos como la validación y experimentación de resultados permiten dar credibilidad al estudio realizado y la parte de animación, permite brindar un mejor entendimiento a los interesados en el estudio de las simulaciones desarrolladas.

### 2.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Cuando un modelo es finalizado, se debe evaluar con tal profundidad que el nivel de confianza que generen los resultados, sean lo suficientemente altos para garantizar que el sistema real funcione sin inconvenientes.

La verificación de resultados está enfocada en realizar comparaciones entre el código computacional generado y el modelo conceptual realizado con anterioridad. La finalidad de ello es verificar parámetros como determinar si la codificación esta correcta, si los datos entrantes son válidos y si la lógica del programa es la deseada. Posteriormente a realizar la verificación, se procede a efectuar la validación de los resultados que consiste en demostrar que el modelo es una representación exacta del entorno real. Para esto, es conveniente basarse en la información obtenida en la verificación con el fin de alcanzar los resultados deseados [VII].

### 2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

La simulación desarrollada en MATLAB cuenta con varias características que permiten simular gran variedad de escenarios de sistemas MIMO. A continuación se mencionan dichos parámetros:

- Algoritmos de Detección: ZF, MMSE, Esférico y ML
- Modulaciones: QPSK y 16QAM
- Arreglos de Antenas: 2x2 y 4x4
- Modelos de Canal: AWGN y Rayleigh

También se puede variar el número de tramas enviadas en la transmisión.

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos se ilustran por medio de cuadros que muestran curvas de desempeño en donde se observa la tasa de Error de Bit y la energía de Bit utilizada. A continuación se ilustran tres escenarios.

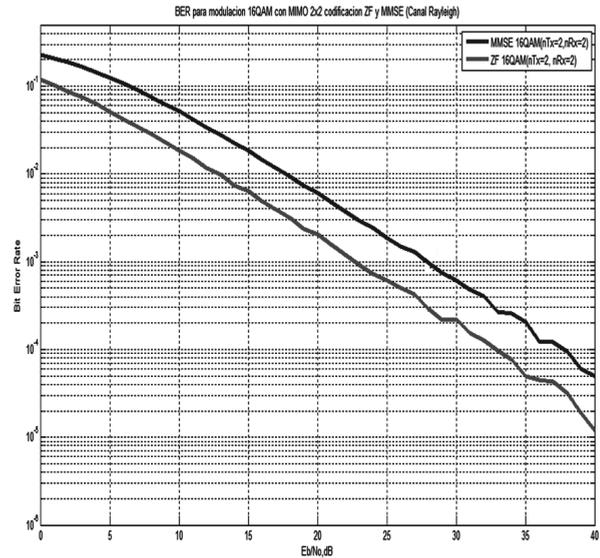
#### Escenario 1: Sistema MIMO 2x2, ZF y MMSE con canal Rayleigh

En la figura 4 se observa que para la modulación 16QAM, las curvas del sistema MIMO 2x2 tienen pendientes similares tanto para ZF como para MMSE y tienden a ser lineales (pendiente constante) para valores de BER comprendidos entre  $10^{-1}$  y  $10^{-4}$ . Así mismo, para valores más bajos de BER (entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$ ) la pendiente empieza a fluctuar.

En la figura 4 se observa que para 16QAM, el desempeño de ZF es mejor que MMSE. Esto se debe a que en MMSE se tiene en cuenta el ruido producido durante la

transmisión dando como resultado que la tasa de error de bit es mayor que en ZF para iguales valores de SNR.

FIGURA 4. BER Escenario 1



También se observa en la figura 4 que para alcanzar una BER de  $10^{-2}$ , el sistema MMSE requiere una  $E_b/N_0$  de 6dB y el sistema ZF requiere 1dB. En la tabla 1 se presentan las  $E_b/N_0$  que se requieren para alcanzar determinados valores de BER para los dos sistemas.

TABLA 1. Valores de  $E_b/N_0$  requeridos para alcanzar valores de BER entre 1 y  $10^{-5}$  para Escenario 1

BER	$E_b/N_0$ (dB)	
	ZF	MMSE
1	--	--
$10^{-1}$	1	6
$10^{-2}$	13	18
$10^{-3}$	23	28
$10^{-4}$	33	38
$10^{-5}$	41	--

#### Escenario 2: Sistema MIMO 2x2 y 4x4, ZF utilizando canal Rayleigh

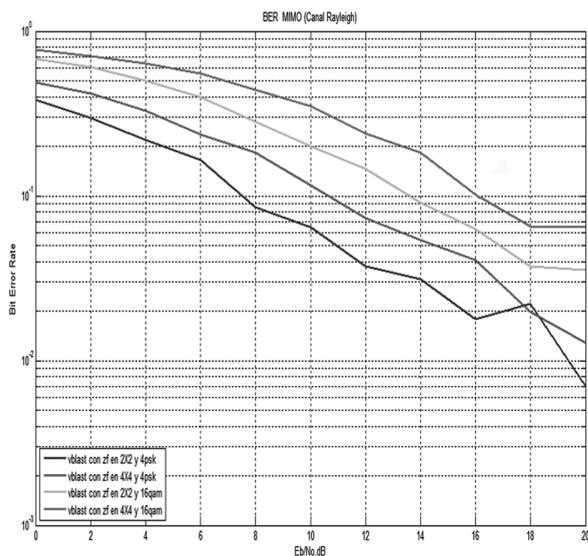
La figura 5 muestra los resultados obtenidos en un sistema ZF en el que se varía el número de antenas y la modulación. Se ilustran cuatro curvas que muestran el desempeño del sistema dependido la configuración empleada. Para este escenario se emplean las modulaciones QPSK y 16QAM, arreglos 2x2 y 4x4, canal

Rayleigh y se transmiten trescientas tramas de 1024 bits cada una.

El sistema que mejores resultados ofrece es el que emplea un arreglo 2x2 con modulación QPSK seguido por el sistema QPSK con arreglo de antenas 4x4. Mientras que los resultados más pobres son los presentados por los sistemas 2x2 y 4x4 empleando 16QAM. Con la modulación 16QAM se envían mas bits en un mismo instante de tiempo comparado con QPSK, aumentando la probabilidad de interferencia intersimbólica.

El número de antenas empleadas también influye en el desempeño de los sistemas MIMO que utilizan ZF. La figura 4 muestra que para arreglos 2x2 se obtiene un mejor desempeño que para arreglos 4x4 cuando los sistemas utilizan la misma modulación. Esto se debe a que en el sistema 4x4, se incrementa la probabilidad de interferencia por la presencia de mayor cantidad de multitrayectorias, además se hace más compleja la detección en el receptor generando incremento en la BER.

**FIGURA 5.** BER Escenario 2



De la figura 5 se puede deducir que el principal factor que influye en el desempeño de un sistema MIMO con algoritmo de detección ZF es la modulación, seguido por el número de antenas. La tabla 2 muestra los valores de Eb/No requeridos para obtener determinados valores de BER deseados.

**TABLA 2.** BER Escenario 2

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

### Escenario 3: Sistema MIMO con algoritmo de detección ML utilizando canal Rayleigh

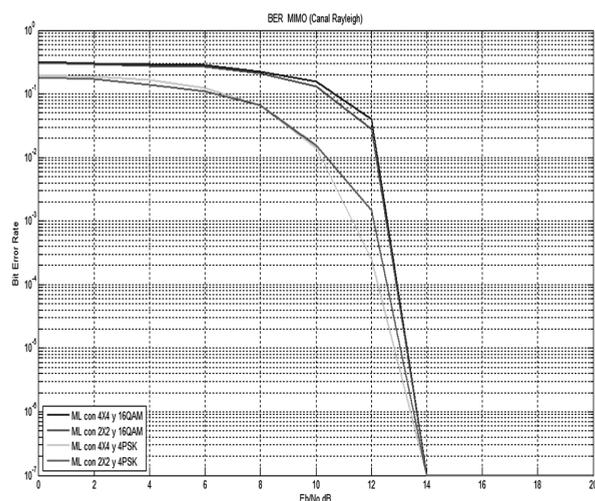
La figura 6 muestra los resultados obtenidos al simular el algoritmo de detección ML con canal Rayleigh y multiplexación V-BLAST con diferentes configuraciones:

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

La figura ilustra el desempeño de las configuraciones, el algoritmo ML tiene un comportamiento excelente inclusive en configuraciones críticas, cuando se utiliza un arreglo 4x4 y modulación 16QAM. Se observa en este caso particular que el desempeño no varía considerablemente cuando se aumenta el número de antenas, aspecto importante si se tiene en cuenta que la capacidad del sistema aumenta al incrementar el número de antenas.

La modulación utilizada, al igual que cuando se utiliza otro tipo de algoritmo de detección, influye directamente en el desempeño del sistema, dando siempre mejores resultados los sistemas que utilizan QPSK, aclarando que para este caso, la diferencia con los sistemas que utilizan 16QAM no es significativa si se tiene en cuenta que la cantidad de información enviada con esta modulación es mayor.

**FIGURA 6.** BER escenario 3



El algoritmo de detección ML muestra desempeños óptimos tal y como se observa en la figura 6, a tal nivel que con valores de  $E_b/N_0$  iguales o superiores a 14 dB, la tasa de error de bit de cualquiera de los cuatro sistemas tiende a cero. Esto es razonable ya que este algoritmo es considerado ideal y lo que se busca con todos los algoritmos de detección es que muestren un desempeño aproximado al ofrecido por ML. La tabla III muestra distintos valores de BER que se obtienen al variar  $E_b/N_0$ . Estos valores se ilustran para las configuraciones ilustradas de la figura 6.

En la tabla 3 se indica que a partir de 14 dB de  $E_b/N_0$ , los valores de BER son iguales a cero.

**TABLA 3.** BER Escenario 3

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

#### 4. CONCLUSIONES

La variación del desempeño del nivel físico de los sistemas MIMO depende de factores como el número de antenas en transmisión y en recepción, la modulación y el algoritmo de detección. Es necesario tener en cuenta los requerimientos mínimos y las características del sistema MIMO a implementar, para escoger la configuración más adecuada.

Los algoritmos de detección ML y Esférico tienen un tiempo de procesamiento alto comparado con ZF y MMSE, pero un desempeño mejor. Los factores que influyen en el tiempo de procesamiento son: el orden de la modulación y la configuración de antenas, es decir, entre mayor sea el orden de la modulación y el arreglo de antenas, el tiempo de procesamiento se incrementará.

El desarrollo de simulaciones es el punto de partida ideal para el estudio y verificación del comportamiento de diversos sistemas, ante la imposibilidad de construirlos o adquirirlos. Cuando se desarrollan simulaciones, es posible estudiar el comportamiento de varios tipos de sistemas, así como sus propiedades y verificar su funcionamiento, de forma más sencilla y económica que cuando se realiza una implementación real.

Los sistemas MIMO deben contar con sistemas de procesamiento de señal más eficiente que los utilizados por otras tecnologías. Este aspecto debe ser tenido en cuenta por los desarrolladores y proveedores de servicios, ya que MIMO pese a su complejidad, combate inconvenientes como el desvanecimiento ocasionado en las señales a causa del multirrayecto.

Los sistemas MIMO son una alternativa viable, ya que según su configuración pueden mejorar el desempeño y/o la tasa de transferencia. MIMO puede constituir una solución a la creciente demanda de servicios que implican la utilización de redes inalámbricas.

Cuando se trabaje con simulaciones, es recomendable ceñirse a una metodología de desarrollo de simulaciones, dado que estas brindan los pasos a seguir para la obtención de resultados esperados. Una buena metodología de simulación seguida de forma correcta, garantiza éxitos en el resultado final, ya que en el transcurso de su elaboración se ejecutan aspectos como selección del lenguaje de programación, validación de resultados, monitoreo y control, entre otros.

#### 5. REFERENCIAS

[1] H. Jafarkhani, "Space-Time Coding: Theory and Practice", "Cambridge University Press", vol. 1, Pag. 221-249, Publicación 2005. [Citado 15 de Diciembre del 2009].

- [II] C. Oestges y B. Clerckx, "MIMO wireless communications", Elsevier, 2007. [Citado 17 de Agosto del 2009].
- [III] D. Gestbert, M. Shafi, et al, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems," "IEEE Journal on Selected Areas in Communications", vol. 21, no. 3, pag. 281-302, Abril 2003. [Citado 17 de Agosto del 2009].
- [IV] G. Foschini, M. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," "Wireless Personal Communications", vol. 6, no. 3, pag. 311-335, Marzo 1998. [Citado 18 de Agosto del 2009].
- [V] H. Artez, D. Seethaler, "Efficient Detection Algorithms for MIMO Channels: A Geometrical Approach to Approximate ML Detection", "IEEE transactions on signal processing", vol. 51, No. 11, Pag. 2808-2820, Noviembre 2003. [Citado 18 de Agosto del 2009].
- [VI] D. Waters, J. Barry. "The Chase Family of Detection Algorithms for Multiple-Input Multiple-Output Channels", "IEEE Transactions on Signal Processing", vol. 56, No. 2, Pag. 739-747, Febrero 2008. [Citado 20 de Agosto del 2009].
- [VII] H. Artez, D. Seethaler, et al, "Efficient Detection Algorithms for MIMO Channels: A Geometrical Approach to Approximate ML Detection," "IEEE transactions on signal processing", vol. 51, no. 11, pag. 2808-2820, Noviembre 2003. [Citado 22 de Agosto del 2009].
- [VIII] Evelio Asataiza Hoyos, Héctor Fabio Bermúdez Orozco, Pablo Andrés Muñoz Gutiérrez, "Simulación de sistemas de telecomunicaciones", Documento desarrollado por docentes de la Universidad del Cauca como guía para simular sistemas de telecomunicaciones, 2004. [Citado 25 de Abril de 2010].