

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previa la obtención del título de:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:  
COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE RECEPCIÓN PARA SISTEMAS  
MIMO 2X2**

**AUTOR:  
CHRISTIAN MESIAS SIMBAÑA MORENO**

**TUTORA:  
VERONICA EMMA SORIA MALDONADO**

**Quito, febrero 2017**

## **Cesión de derechos de autor**

Yo CHRISTIAN MESIAS SIMBAÑA MORENO, con documento de identificación N° 1718442690, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE RECEPCIÓN PARA SISTEMAS MIMO 2X2, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELECTRÓNICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Christian Mesias Simbaña Moreno  
1718442690  
Febrero 2017

### **Declaratoria de coautoría del docente tutora**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE RECEPCIÓN PARA SISTEMAS MIMO 2X2 realizado por Christian Mesias Simbaña Moreno, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero 2017.



-----  
Verónica Emma Soria Maldonado  
1715185961

# COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE RECEPCIÓN PARA SISTEMAS MIMO 2X2

Christian Simbaña<sup>1</sup> y Veronica Soria<sup>2</sup>, *Universidad Politécnica Salesiana*

**Resumen.-** En el presente escrito artículo se realiza un estudio de los diferentes métodos o técnicas de recepción para sistemas MIMO 2x2, clasificándolos en dos sub grupos los óptimos y sub-óptimos. Los cuales son simulados bajo las mismas condiciones como, modulación BPSK, ruido gaussiano blanco y canal Rayleigh.

Las comparaciones realizadas muestran una mejora de 14dB cuando se usa en recepción Maximun Likelihood en comparación con Zero Forcing dentro del mismo entorno. Sin embargo el modelo se analiza para distintos escenarios con lo cual el procesamiento varía en 17,6 segundos entre ML y ZF.

**Abstract .-** In the present paper, a study is made of the different reception methods or techniques for MIMO 2x2 systems, classifying them into two subgroups, the optimal and sub-optimal. Which are simulated under the same conditions as, BPSK modulation, White Gaussian noise and Rayleigh channel.

The comparisons made show an improvement of 14dB when used in Maximun Likelihood reception compared to Zero Forcing within the same environment. However the model is analyzed for different scenarios with which the processing varies in 17.6 seconds between ML and ZF

**Palabras Clave:** reception, Alamouti, ZF, ML, MIMO, STBC.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas requieren una mayor tasa de datos para el usuario, lo cual representa un importante reto de ingeniería. Para ello, recientemente se han considerado nuevos métodos y esquemas para hacer uso de la diversidad espacial del canal, tales como el uso de antenas inteligentes.

En la actualidad el uso de sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, Múltiple-Input Múltiple-Output) ha ido creciendo importantemente [1].

En un sistema de comunicaciones MIMO normal se cuenta con varias antenas de recepción y varias antenas transmisión [2], donde las señales que se reciben son combinadas mejorando la calidad en la comunicación para cada usuario MIMO [1]. Para lo cual trabajan en diversidad espacial o multiplexación espacial [3].

En el sistema de Diversidad se aplica la técnica donde, el receptor (Rx) recibe varias réplicas de la misma señal transmitida (Tx), debido a que en diversidad espacial pueden existir varias antenas en transmisión o recepción para que de esta manera se generen múltiples réplicas de la señal transmitida y mediante una adecuada codificación en la RX se logra mejorar la tasa de error de bit (BER) al decodificar la señal recibida [4]. Mientras tanto que en Multiplexación Espacial, por cada antena transmisora se envían simultáneamente flujos de datos diferentes, en el receptor se observa una superposición lineal [2] con lo cual se aumenta notablemente la velocidad de transmisión pero el BER no mejora como en Diversidad [5].

Los canales MIMO contienen un gran número de enlaces de comunicación, en función de las antenas transmisoras y receptoras de las que conste el sistema, y todos y cada uno de estos enlaces utiliza la misma frecuencia para la propagación de su información, de ahí que el gran reto de esta tecnología es la separación y procesamiento independiente de las múltiples señales de información cuyo destino son los diferentes usuarios [6].

Los canales típicos en un modelo MIMO son canales con desvanecimientos de señal, los canales fading se producen típicamente en un proceso de multitraectoria o de dispersión (scattering), los cuales varían aleatoriamente en amplitud y fase en su señal. Se considera no selectivo en frecuencia el proceso de fading cuando el BW (ancho de banda) de coherencia es mayor al BW señalado, de manera más clara, cuando son afectadas las componentes espectrales del BW de la señal debido al canal. Cuando se obtiene una señal en el receptor con componentes dispersos decorrelatadas, el procedimiento de fading será de tipo Rayleigh. Si en el receptor se tiene una fuerte componente en la forma de onda, como de un repetidor fijo en medio del sistema, el procedimiento de fading será de tipo Rician [7].

Se ha realizado un análisis comparativo de los algoritmos Alamouti, ZF y ML usando la herramienta matemática MATLAB para comprobar la varianza que existe en el BER de cada uno de las técnicas de recepción

<sup>1</sup>C. M. Simbaña estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en la Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador (e-mail: csimbana@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup>E.V. Soria Ingeniera de la Carrera de Ingeniería Electrónica Universidad Politécnica Salesiana Campus-Sur, Quito, Ecuador (e-mail: vsoria@ups.edu.ec)

usadas en un canal tipo Rayleigh para de esta manera validar cual se asemeja a la teoría de MIMO.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO funcionan combinando en transmisión con múltiples antenas y de igual manera en recepción. Mediante el dominio espacial MIMO incrementa relativamente la eficiencia espectral en los sistemas inalámbricos de transmisión, de tal manera que aprovecha todos los fenómenos de la propagación de señales con el fin de incrementar o disminuir la tasa de error [5].

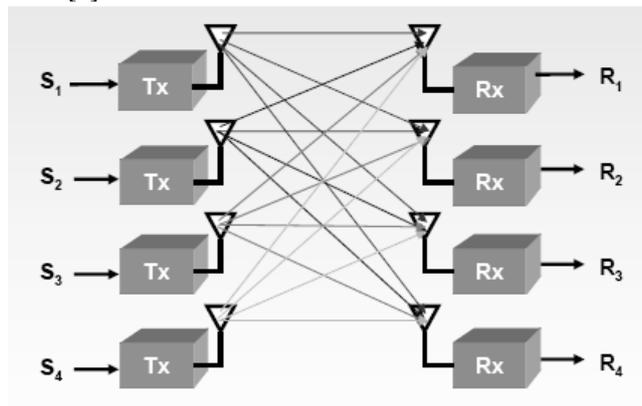


Figura 1. Sistema básico MIMO

Al tener un mayor número de antenas tanto para transmisión como recepción, mayor será la fiabilidad y eficacia de la comunicación recibida, esto debido a que aumenta el número de señales enviadas y dependerá del método de recepción para que la señal no tenga diferencias. Es decir, si se tiene M antenas en transmisión y N antenas receptoras. Es por ello que se tiene un número de enlaces independientes de M\*N, por lo que nuestra diversidad de canal será M\*N [6].

Teniendo en cuenta lo mencionado las ecuaciones que rigen para la transmisión de las señales de M\*N es:

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

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

y, es la componente que recibe el receptor.

Hx, la matriz del canal

n, es el ruido aditivo gaussiano.

Para que exista diversidad espacial se debe trabajar con una transmisión y recepción con varias antenas separadas por una distancia mínima, con el fin de crear canales discriminados en TX - RX.

### 2.2. Diversidad

Es la técnica donde, el receptor (Rx) recibe varias réplicas de la misma señal transmitida (Tx), debido a que en diversidad espacial pueden existir varias antenas en transmisión o recepción para que de esta manera se generen múltiples réplicas de la señal transmitida y

mediante una adecuada codificación en la RX se logra mejorar la tasa de error de bit (BER) en señal recibida y previamente decodificada [1]. En otras palabras, ambos canales espectrales transmiten simultáneamente una señal con los mismos datos a espera de que sean recibidas en transmisión por lo menos una de ellas.

La codificación más aplicada para diversidad es ALAMOUTI en la cual no es necesario conocer el canal o medio en el cual se va a transmitir.

### 2.3. Alamouti

El código ALAMOUTI es desarrollado en 1988 como un código de bloque simple de espacio tiempo SPACE TIME BLOCK CODE, siendo este el más simple de todos los STBCs.

Es el único STBC ortogonal que logra su BER de -1, ya que se necesita dos intervalos de tiempo para transmitir dos símbolos diferentes. El sistema 2x2 se puede representar bajo la Figura 2 2 y ecuación 3.

Matriz de transmisión Alamouti MIMO 2X2

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

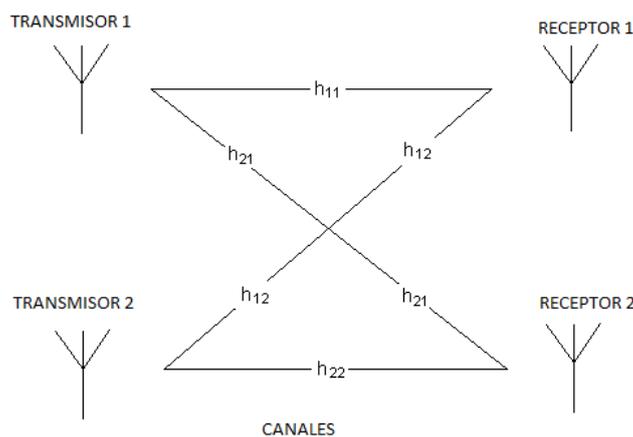


Figura 2. Sistema MIMO 2x2

### 2.4. Multiplexación Espacial

En este sistema se emite flujos de datos diferentes de información por las antenas transmisoras, en el receptor se evidencia una superposición lineal lo que mejora notablemente la velocidad en la transmisión de datos. En este sistema no se produce en la redundancia en la transmisión por lo que en la señal recibida no mejoraría el BER.

Para solventar el BER se aplica algoritmos de detección de señal, los cuales pasan a decodificar las señales complejas en el receptor, esta labor es más compleja que la desarrollada en un sistema de una sola antena en transmisión y recepción o como la planteada en Diversidad.

El algoritmo de detección de señal óptimo es el de Máxima Verosimilitud (ML, Maximun Likelihood) aplica técnicas estadísticas las cuales minimizan la probabilidad de error, usando todos los vectores que son catalogados como probables [2].

La forma de clasificar a estos algoritmos es en dos formas, óptimos y sub-óptimos donde los óptimos son aproximadamente iguales al ML refiriéndose a su

funcionalidad pero con un menor grado de complejidad, donde están los denominados algoritmos de búsqueda en árbol como FSD y QRD-M. Por otro lado, los algoritmos sub-óptimos con menor complejidad que los algoritmos óptimos y un desempeño menor, de los cuales podemos referirnos a: (ZF, Forzado a Cero), (MMSE, Mínimo error cuadrático) entre otros [2].

### 2.5. Zero Forcing

El Zero Forcing (Forzado a cero) es una técnica sub-óptima de pre-decodificación lineal [8], la cual mediante transmisiones ortogonales mitiga la interferencia inter usuario en el sistema [9].

$$x_k = W_k u_k \quad (4)$$

Donde:

$x_k$ , es la señal envía por las antenas de la estación base.

$W_k$ , matriz de codificación del canal.

$u_k$ , es el vector de símbolos enviados.

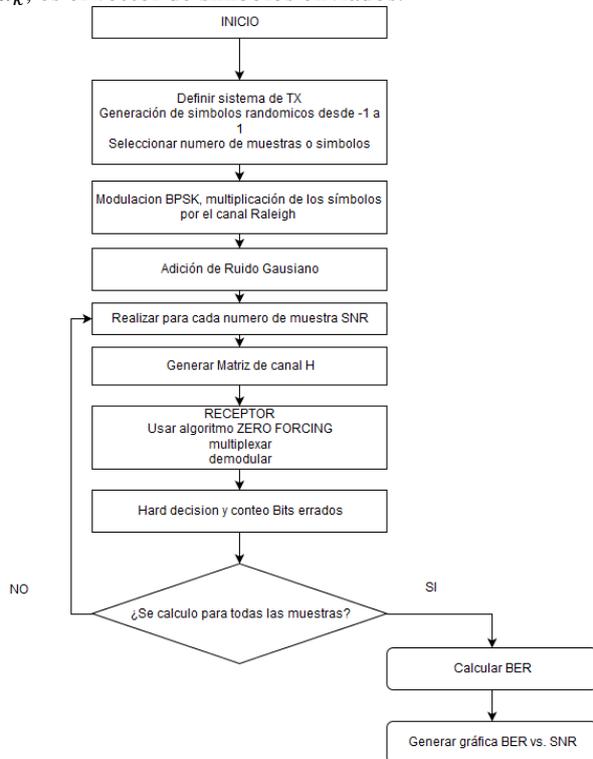


Figura 3. Diagrama de Flujo para Zero Forcing.

### 2.6. Maximun Likelihood

Es una de las más cercanas a la técnica de recepción MRC en 1x2. La técnica aplica un modelo probabilístico lo cual hace que este algoritmo pertenezca al grupo de los óptimos y con una complejidad relativamente menor.

$$J = |y - H\hat{x}|^2 \quad (5)$$

Donde:

$J$ , ecuación del modelo probabilístico.

$y$ , vector recibido.

$H\hat{x}$ , estimación del mensaje hipotético

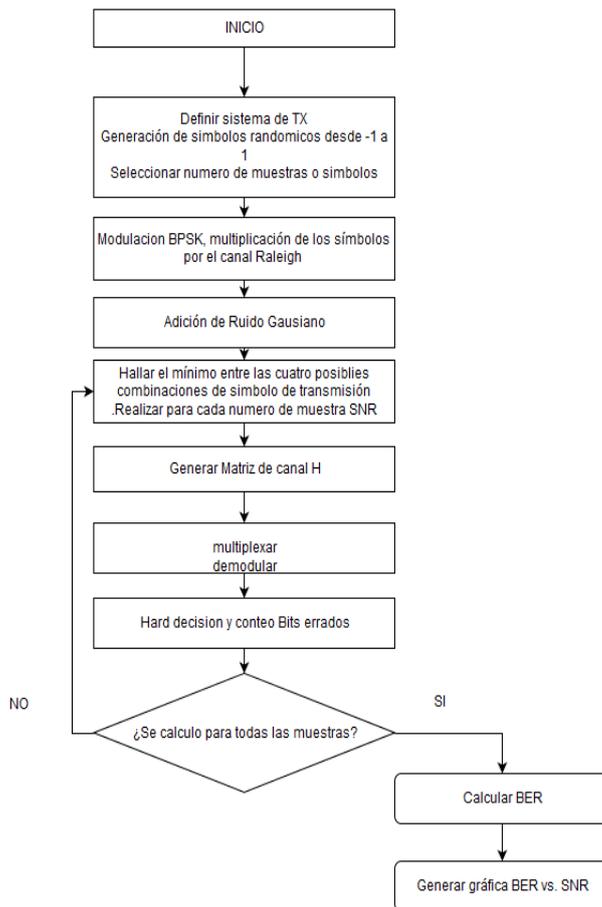


Figura 4. Diagrama de Flujo para Maximun Likelihood.

## 3. ANALISIS DE RESULTADOS

Para simular los diferentes algoritmos de recepción se ha desarrollado el código de programación mediante el software Matlab, bajo un mismo escenario ya que el software permite manipular matrices, crear algoritmos y realizar las gráficas comparativas.

Para cada una de las técnicas de recepción se ha seguido sistemáticamente los diagramas de las figuras 3 y 4 con el fin de determinar la complejidad computacional y evaluar las mejoras en los tiempos con relación a los diferentes algoritmos de recepción.

Para el análisis se toma en cuenta la equidistancia de las curvas de desempeño correspondientes a las diferentes Técnicas de Recepción para obtener la diferencia entre los valores SNR para una misma BER.

La figura 5 muestra el diagrama de bloques implementado para simular un sistema MIMO de 2x2 mediante Matlab para las diferentes técnicas de recepción indicadas anteriormente como ZF y ML, usando la modulación BPSK en banda base de -1 a 1, con un canal conocido tipo Rayleigh con ruido Gaussiano blanco  $< 0$ . Para la generación de datos se mantiene una constante de número de bits  $N = 10^6$ .

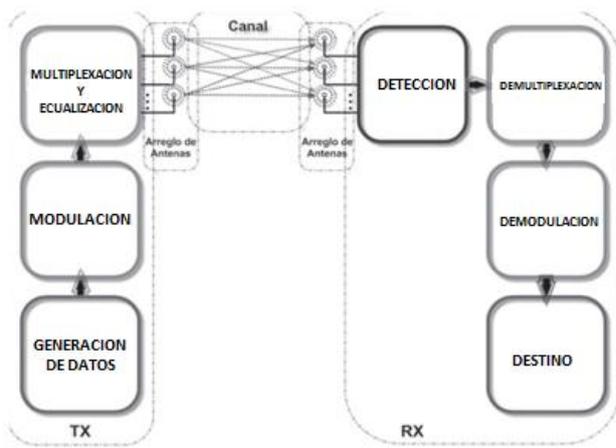


Figura 5. Diagrama de bloques sistema MIMO básico.

Tras la verificación de la equidistancia entre las curvas presentadas en la Figura 6 se puede concluir que:

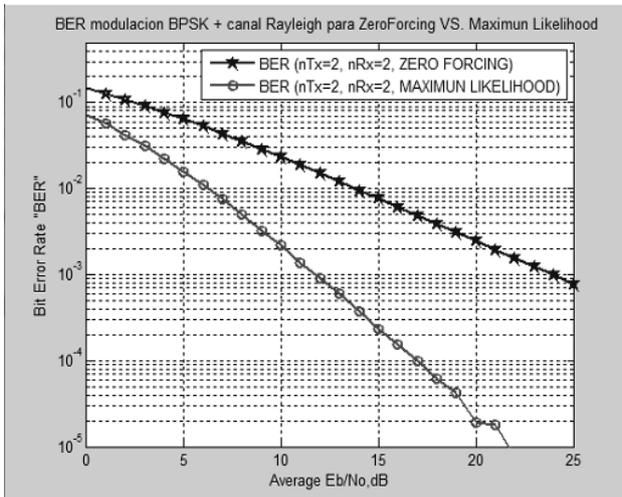


Figura 6. Grafica de BER comparando Zero Forcing Vs. Maximun Likelihood en un sistema mimo 2x2.

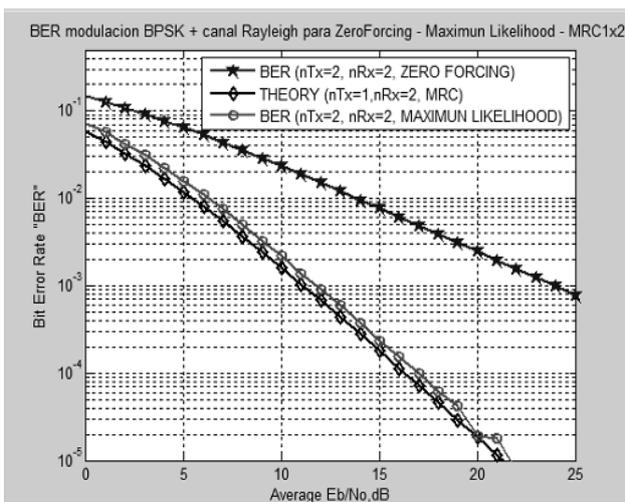


Figura 7. Grafica de BER comparando Zero Forcing y Maximun Likelihood en un sistema mimo 2x2 Vs. Señal teórica obtenida para MRC en un sistema 1x2.

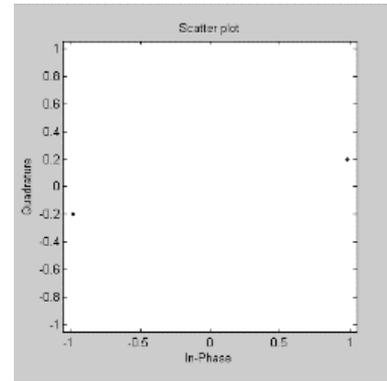


Figura 8. Diagrama de constelaciones para BER 2X2

Teniendo en cuenta que el FEC con el que se realiza comparaciones es en la escala  $10^{-3}$ , al usar la técnica de recepción ZF mejora el BER a medida que aumenta los dB del SNR, esto quiere decir que es directamente proporcional a la potencia aplicada ya que al aumentar la misma se evidenciará un mejor BER y así se obtiene un menor error en esta Técnica de Recepción

Al usar la técnica de recepción Maximun Likelihood, la curva se ajusta de una manera altamente aproximada a MCR 1x2 mostrada en la Figura 7. Como se indica por definición el modelo probabilístico logra duplicar la velocidad de MCR 1X2 con una baja complejidad. Esta técnica evidencia una diferencia de BER de 14dB con relación a ZF y de 4,5dB con relación a Alamouti con MCR en el punto  $10^{-3}$  en la escala BER.

Tabla 1. Tabla de BER entre Técnicas de Recepción.

	Zero Forcing	Maximum Likelihood	MRC 1X2
Zero Forcing		12dB	11,5dB
Maximum Likelihood	12dB		0,5dB

Como se muestra en la Figura 7 la curva más cercana al MRC es la obtenida mediante ML con 0,5dB en el punto  $10^{-3}$  en la escala BER.

Al comparar las técnicas óptimas como Maximun Likelihood con las sub-óptimas como Zero Forcing se evidencia existe una gran diferencia de hasta 14dB en la Figura 6 esto debido a que para el caso de Zero Forcing incluso en una transmisión y canal ideal el modelo empieza a intentar eliminar señales debido a que los términos diagonales fuera de la Matriz transpuesta no son 0, de ese modo no se tiene una amplificación de ruido por lo que difiere de Maximun Likelihood.

Para determinar el algoritmo que consume menor complejidad computacional en las técnicas de recepción "a posteriori" el cual se ha simulado en un computador con Procesador Intel COREi3-3217U de 1.8Ghz con 4Gb RAM se ha configurado un tic-toc en el proceso de recepción para las muestras en el ciclo. Con lo cual en segundos se calculará el tiempo de demora al realizar la ejecución de ecuaciones y operaciones empleadas en el algoritmo correspondiente donde se valida que el algoritmo con menor complejidad computacional es el de Zero Forcing según la Tabla 2 con un tiempo de ejecución de 36,641s. Denotando de esta manera que el

algoritmo más rápido para recepción es el sub-óptimo, sin embargo no es el más efectivo ya que difiere 12db en un nivel de BER de  $10^{-3}$ .

Tabla 2. Análisis de complejidad.

Algoritmo	Tiempo de ejecución (s)
Zero Forcing	36.641
Maximun Likelihood	54.260

Para relación de comparación en el propósito, se ha realizado el cálculo de la complejidad computacional al realizar todas las operaciones a la vez en el software, usando el mismo for para las muestras donde el coste total de complejidad ha sido 205.337s.

Alamouti propone un estudio en diversidad de transmisión y al aplicarlo en el sistema complementa el estudio de técnicas de recepción ya que como se describió en citas anteriores Alamouti es el único STBC que logra una tasa de transmisión -1 es decir que logra su ganancia de diversidad completa sin necesidad de mermar su velocidad de esta manera logra mejorar los resultados en las diferentes técnicas de recepción. Por ejemplo en una radio base de transmisión, las cuales ofrecen servicio a varias antenas remotas, de esta manera al integrar un arreglo de antenas a la estación base se logrará una mejor recepción en todos los terminales que se encuentren en el área de cobertura, con lo cual se convierte en un sistema MXN. Al aplicar el estudio realizado al esquema mencionado se puede validar que la opción de Zero Forcing es la más económica ya que el costo computacional es menor lo cual conlleva a que no necesita un hardware y software robusto en recepción y se obtiene una diversidad de ganancia relativamente aceptable ya que mejora el modelo tradicional 1x1. Del otro lado al usar un algoritmo óptimo como Maximun Likelihood el costo computacional sube con lo cual se necesita un hardware y software robusto y se obtiene una diversidad de ganancia muy superior, lo que indica que el sistema Transmisor – Receptor trabajaría de manera correcta y fiable, mejorando la tasa de error, el índice de datos y la capacidad de sistemas inalámbricos.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio de los algoritmos Alamouti, Zero Forcing y Maximun Likelihood permitió comprobar la similitud en curvas de desempeño con la de trabajos anteriores, validando el acercamiento a MRC 1X2 con 0,5dB para el caso de Maximun Likelihood y de 11,5dB para el caso de Zero Forcing en SNR. Como adicional el estudio permitió constatar una diferencia de 14dB entre ML y ZF tomada en la escala de BER  $10^{-3}$ , sin embargo el tiempo de procesamiento mejora en 17,6 segundos cuando se trabaja con Zero Forcing mostrando que esta técnica de recepción se puede usar en tiempo real dependiendo de la robustez del canal.

En un sistema MIMO 2x2 el algoritmo que obtiene un menor BER es el de Maximun Likelihood como se había validado en textos previamente ya que es el que más se aproxima al MCR en un arreglo 2x1 con apenas 0.5dB en la escala de BER  $10^{-3}$ , aunque el costo computacional

de este es de 54,26s el cual es más alto comparado con Zero Forcing con 36.641s.

Se puede concluir que los algoritmos de detección van mejorando su BER a medida que la potencia aumenta. En el caso de Zero Forcing este mejora el BER a medida que el ruido va disminuyendo a 7dB en la escala de BER  $10^{-2}$  incluso sumando el canal al sistema ya que este algoritmo no necesita tener el conocimiento del canal sin embargo la complejidad computacional es menor.

Debido a las diferencias expuestas en costo computacional y BER en los algoritmos Zero Forcing (sub-óptimo) y Maximun Likelihood (óptimo) se debe verificar el entorno en los que se van a aplicar ya que el costo beneficio se deberá validar en función del tipo de información a transmitir teniendo en cuenta que ambos son aplicables dependiendo los requerimientos del sistema.

#### 5. RECOMENDACIONES

Para futuros análisis en técnicas de recepción se podría usar diferentes tipos de modulación en un sistema MIMO 2x2 con la finalidad de validar si se consigue mejorar el costo computacional y la diferencia de BER, se propone usar diferentes modulaciones OFDM, QPSK. Se debe considerar que los sistemas MIMO dependen del número de antenas en Tx-Rx, la técnica de recepción y la modulación aplicada ya que estos parámetros al ser bien elegidos obtendrán un sistema óptimo para cada requerimiento puntual.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] M. S. y. D.-s. S. David Gesbert, «From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space–Time Coded Wireless Systems,» *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 21, n° 3, pp. 281-302, Abril 2003.
- [2] T. M. y. C. M. H. Catalina Muñoz C., «Análisis comparativo del desempeño de los algoritmos FSD y QRD-M en sistemas MIMO 4X4,» *Gerenc. Tecnol. Inform. | Vol. 11 | N° 30*, pp. 25-36, 2012.
- [3] ALBENTIA SYSTEMS, «Tecnología Mimo,» 6 6 2014. [En línea]. Available: <http://www.albentia.com/documentacion.php>. [Último acceso: 30 12 2015].
- [4] M. E.-H. y. L. Hanzo, «Multifunctional MIMO systems: A combined diversity and multiplexing desing perspective,» *IEEE Wireless Communications*, pp. 73-79, 2010.
- [5] Albentia Systems, «Tecnología Mimo,» 6 6 2014. [En línea]. Available: <http://www.albentia.com/documentacion.php>. [Último acceso: 30 12 2015].
- [6] D. S. Herrera, «Estudio de dualidad transmisión-recepción en sistemas mimo multiusuario (Tesis de pregrado),» pp. 14-17, 2009.
- [7] Labtel, «Laboratorio de teoría de Información,» *Canal de comunicaciones*, vol. 5, pp. 1-8, 2002.
- [8] J. M. Asensio, «Comparativa de técnicas de precodificación ZF y MMSE en un sistema

- celular coordinado,» *Proyecto fin de carrera, Departamentode Teoria de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid*, pp. 37-48, 2011.
- [9] M. A. Pandey y M. R. Ahmad, «Comparison of Wireless MIMO System Under Alamouti's Scheme and Maximum Ratio Combining Technique,» *I.J. Image, Graphics and Signal Processing*, vol. 2, pp. 31-37, 2013.
- [10] A. A. Dowhuszko, «Teoría de la Transmisión de Información sobre Canales MIMO Inalámbricos con Múltiples Usuarios,» *Tesis de doctor en ciencias de la ingeniería, Universidad Nacional de Cordova*, pp. 65-70, 2010.
- [11] C. Wang, E. K. S. Au, R. D. Murch, W. H. Mow, R. S. Cheng y V. Lau, «On the Performance of the MIMO Zero-Forcing Receiver in the Presence of Channel Estimation Error,» *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 6, nº 3, pp. 805 - 810, 2007.
- [12] A. H. Mehana y A. Nosratinia, «Diversity of MMSE MIMO Receivers,» *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 1-18, 2012.
- [13] J. Jaldén, «Maximum Likelihood Detection for the Linear MIMO Channel,» de *Licentiate Thesis, Department of Signals, Sensors and Systems, Royal Institute of Technology (KTH)*, Stockholm Sweden, 2004, pp. 9-35.