

Evaluación de la Técnica Multiantena MIMO en Sistemas Inalámbricos OFDM mediante el desarrollo de un Simulador

JOSE CORDOVA, REBECA ESTRADA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral - ESPOL
Km. 30.5 Vía Perimetral
GUAYAQUIL - ECUADOR
jecordov@espol.edu.ec, restrada@espol.edu.ec

Resumen

Este artículo presenta el diseño y desarrollo de una herramienta de software que ayuda a la comprensión del esquema de Alamouti MIMO (Multiple Input Multiple Output) en sistemas OFDM, la herramienta se presenta a través de ejemplos y resultados de la simulación dando un enfoque atractivo y dinámico a través de una interfaz gráfica de usuario para introducir la técnica MIMO el objetivo de esta herramienta es incrementar el interés en esta área particular de investigación para los cursos de Comunicaciones Inalámbricas en ESPOL donde los estudiantes podrán usar esta herramienta como soporte didáctico.

Palabras clave: - MIMO, OFDM, GUI, Alamouti, STC, Simulador Didáctico, Comunicaciones Inalámbricas.

Abstract

This paper presents the design and development of a software tool that helps to understand the Alamouti MIMO (Multiple Input Multiple Output) OFDM scheme, the tool is presented through some examples and simulation results of image transmission, giving an attractive and dynamic way through a graphical user interface to introduce the MIMO technique, the tool's objective is to increase the interest on this area of research particularly for the Wireless Communications courses at ESPOL, where students will be able to use this tool as a didactical support.

Key-Words: - MIMO, OFDM, GUI, Alamouti, STC, Didactical Software Simulator, Wireless Communications.

1. Introducción

El uso de Múltiples Antenas en lugar de un sistema inalámbrico con una sola antena emisora y receptora es en la actualidad un tema de gran interés y de investigación constante, por lo que el presente trabajo plantea la creación de una herramienta que ayude a incrementar por un lado la comprensión en el estudio de este tipo de sistemas MIMO y de una manera atractiva y dinámica mediante una interfaz gráfica de usuario introducir la técnica MIMO el enfoque de Alamouti en la investigación, en particular se ha desarrollado para los cursos de comunicaciones inalámbricas de ESPOL.

En la sección 2 se detalla la técnica de Alamouti para sistemas con diversidad en transmisión aplicable para nuestro diseño MIMO, en la sección 3 se presentan detalles de la implementación del sistema, en particular el tratamiento de la señal de imagen con la que se trabajará en la simulación y el diseño del transmisor así como también la descripción del algoritmo.

En la sección 4 se presentan los resultados del sistema desarrollado, dichos resultados incluyen capturas de pantalla de la GUI desarrollada y detalles de la usabilidad del sistema, adicionalmente se presentan los resultados en señales imágenes de ejemplo y se describen los mismos, además se presentan diferentes discusiones sobre casos particulares y su análisis usando curvas BER vs. SNR que también están disponibles de la simulación.

Finalmente se presentan las conclusiones sobre el desarrollo de esta herramienta y la evaluación del rendimiento de la técnica MIMO Alamouti en sistemas OFDM.

2. Alamouti STC

Alamouti en [2] propuso un esquema de Codificación Espacio Temporal en Bloque (STBC) [1] dentro de la técnica de Diversidad en Transmisión usando dos antenas en el transmisor y una antena en el

receptor, un sistema 2x1. La división de transmisión de los símbolos esta explicada en la Tabla 2.1.

INSTANTE	ANTENA 1	ANTENA 2
$t = 0$	s_0	s_1
$t = T$	$-s_1^*$	s_0^*

Tabla 2.1 Esquema de Alamouti STC

Para este la descripción del procesamiento de este esquema transmisión/recepción se realizará la asunción de que el canal esta en desvanecimiento plano y que el canal es constante durante dos símbolos en tiempos consecutivos.

La matriz generadora del Código Alamouti para la transmisión sería la siguiente:

$$S = \begin{bmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

La primera fila de la Matriz S corresponde a la información transmitida por la primera antena y la segunda fila a la información transmitida por la segunda antena. Considerando un canal con desvanecimiento plano al tener la configuración MIMO 2x1 existirán 2 trayectorias de propagación del canal H, estas serían:

$$H = [h_0 \quad h_1] \quad (2)$$

En donde tendríamos para cada uno de los coeficientes de las trayectorias:

$$h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \quad (3)$$

$$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \quad (4)$$

Tomaremos entonces la respuesta del sistema para cada uno de los instantes de transmisión:

TIME	$y = Hx + n$	RESPONSE
$t = 0$	$y_0 = [h_0 \quad h_1] \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + n_0$	$r_0 = s_0 h_0 + s_1 h_1 + n_0$
$t = T$	$y_1 = [h_0 \quad h_1] \begin{bmatrix} -s_1^* \\ s_0^* \end{bmatrix} + n_1$	$r_1 = -s_1^* h_0 + s_0^* h_1 + n_1$

Tabla 2.2 Respuesta del Canal.

Lo mostrado en la Tabla II indica que en el receptor esperaremos dos instantes para formar el vector de recepción, el cual se plantea de la siguiente manera:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s(1) \\ s(2) \end{pmatrix} + n = Hs + n \quad (5)$$

A partir de (5) podemos encontrar la matriz conjugada y transpuesta de H:

$$H^H = \begin{bmatrix} h_0^* & h_1 \\ h_1^* & -h_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Con (6) lo que en el receptor multiplicaremos la señal recibida luego de los dos instantes de tiempo por esta matriz con lo que:

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = H^H y = \begin{bmatrix} y_0 h_0^* + h_1 y_1^* \\ y_0 h_1^* - h_0 y_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_0 h_0^* + h_1 h_1^*) s_0 \\ (h_1 h_1^* + h_0 h_0^*) s_1 \end{bmatrix} + H^H n \quad (8)$$

En donde ya obtendríamos los símbolos estimados los cuales son los símbolos originalmente transmitidos afectados por el canal y el ruido blanco considerado, esta señal se puede recuperar usando un Decodificador ML que estimará a la señal s.

3 MIMO OFDM Diseño de Solución

3.1 Especificaciones del Diseño del Sistema

En el sistema diseñado se ha considerado como señal de entrada a transmitir una señal de Imagen, por lo que se ha incluido un esquema de digitalización de la misma.

La técnica MIMO sera el esquema de codificación de Alamouti descrito anteriormente, para lograr una evaluación del sistema se implementará también el sistema SISO.

El esquema de Alamouti sera evaluado usando Modulación Ortogonal por División de Frecuencias - OFDM; usaremos las especificaciones de la Tabla 2.3.

El principal enfoque del simulador no será evaluar el desempeño OFDM, por lo que los parámetros de la tabla 2.3 permanecerán constantes y se asumirá que el receptor tundra conocimiento total del canal (Channel State Information - CSI) así lograremos enfocarnos en la aplicación de la codificación de Alamouti.

La detección OFDM esta basada en la ecualización en el dominio de la frecuencia como se explica en [3], el esquema de detección para la codificación de Alamouti presentada en la sección anterior asumió que el canal estaba bajo desvanecimiento plano, en el diseño se usará la combinación de MIMO ALAMOUTI con OFDM.

PARAMETRO	VALOR
FFT PUNTOS	64
Numero de Subportadoras de datos	52
Numero de bits por símbolo	52
Prefijo Cíclico	1/4, 16 símbolos
Numero total de Subportadoras	64
Guarda + Símbolo	80
Zero Padding	12 símbolos

Tabla 2.3 Especificaciones OFDM

OFDM convierte un canal selectivo en frecuencia en un conjunto de canales planos en frecuencia [3,4]; con esta colección de canales el esquema de detección para Alamouti podrá ser usado en cada uno de los canales planos.

3.2 Detalles de Simulación

3.2.1 Procesamiento de Imagen

El formato de imágenes que se tratarán en el sistema será JPG de cualquier tamaño y gama de colores, y las imágenes dentro del simulador serán procesadas para que tengan un tamaño acorde con los objetivos del simulador y así mismo el formato en blanco y negro para facilitar la digitalización del mismo.

El propósito de transmitir una imagen es hacer la evaluación del sistema para el usuario más práctica y didáctica, evaluando la calidad de la imagen recuperada se pueden identificar rápidamente los errores producidos por el medio, el efecto de variaciones del modelo del canal, variaciones de SNR entre otros.

Para el tratamiento de la señal de imagen en el sistema se considera el procedimiento ilustrado en la Figura 3.1, en la misma se describe el uso de la función “imread” de MATLAB [5] como la encargada de “digitalizar” la imagen, “imread” toma un archivo de formato de imagen y realiza el procesamiento para devolver la imagen digitalizada en formato RGB (Red, Green, Blue – Rojo, Verde, Azul).

Con la representación mencionada en el párrafo anterior tendremos que las dimensiones ancho y alto de la imagen corresponderán al número de filas y columnas de las matrices resultantes y cada uno de los pixeles de la imagen a color estará representado por 3 valores correspondientes a los elementos de las 3 matrices cada una describiendo a cada pixel por su

composición de color en Rojo, Verde y Azul respectivamente.

Cada elemento de cada una de las matrices de acuerdo al formato RGB de MATLAB puede tener un valor entre 0 y 255 el cual determinará la cantidad de rojo, verde y azul con el cual está compuesto un pixel.

Para obtener una representación binaria de la imagen deberíamos obtener la representación binaria de cada uno de los valores de todas las matrices, entonces, si el tamaño de la imagen es de $M \times N$ pixeles el total de bits en la representación binaria de la imagen a color será $M \times N \times 3 \times 8$, dado que cada valor de 0 a 255 necesitará 8 bits para digitalizarse en cada una de las tres matrices.

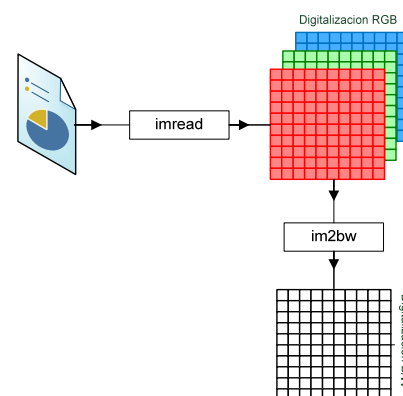


Figura 3.1 Digitalización de la Imagen a Transmitir

Con el objetivo de hacer menores los tiempos de simulación se ha diseñado el sistema para tratar imágenes en blanco y negro por lo que luego de la digitalización de la imagen con “imread” dicha señal resultante se convertirá en una señal imagen en blanco y negro como termina de describir la Figura 3.1.

3.2.2 Descripción del proceso de Transmisión

El proceso de transmisión es el mayor enfoque en el desarrollo del simulador, en el transmisor se encuentra el codificador espacio temporal que es el que permite realizar la comunicación MIMO.

La señal de imagen digitalizada en forma de matriz binaria es transformada en un vector largo que contiene la misma información de la matriz original, el vector con la información de la imagen es entonces mapeada usando un esquema de modulación BPSK¹.

Con los símbolos modulados la señal pasa al ensamblado de los símbolos de acuerdo a las

¹ Binary Phase Shift Keying

especificaciones del sistema, en la Figura 3.2 se muestra el proceso de modulación mencionado anteriormente y adicionalmente se representa la formación de los símbolos.

Cada fila de la nueva matriz formada representa un símbolo OFDM que se está formando, como indican las especificaciones con 52 bits por símbolo. Estos símbolos serán transmitidos secuencialmente en donde cada fila representa no solo el símbolo sino también la duración del mismo.

El conjunto de símbolos formados deben ser procesados por un codificador espacio-temporal, la figura 3.3 muestra el proceso de codificación en conjunto con los resultados, el codificador espacio-temporal usado es de acuerdo a las especificaciones un codificador de Alamouti, como el descrito en la sección 2.6.2, el resultado de esta codificación en el sistema serán las señales o conjunto de símbolos codificados que se transmitirán o serán procesadas para cada una de las antenas transmisoras.

Para el esquema OFDM es transparente la codificación de Alamouti pues el modulador OFDM conformado por los bloques IFFT y la agregación del CP reciben a los símbolos codificados en cada una de las antenas como símbolos de información e independiente una antena de la otra, es entonces cuando los símbolos, cada fila de la matriz codificada, son operados con la IFFT lo que representa la modulación de cada una de los símbolos en 64 subportadoras de acuerdo a las especificaciones, mostrado en la Figura 3.4

El canal se modela de acuerdo a la cantidad de símbolos, esta condición permitirá mantener independiente el desvanecimiento multirayectoria que afecta a cada símbolo y también se deberá considerar independiente el desvanecimiento multirayectoria que afecta a cada antena. La formación de la matriz del canal también dependerá del tipo de canal que se está simulando lo que deja al usuario a poder simular canales planos y selectivos en frecuencia y evaluar el sistema a diferente numero de taps.

El desvanecimiento multirayectoria que sufrirán los símbolos OFDM es representado en la matriz del canal por la distribución Rayleigh contando con los coeficientes del canal Gaussianos en sus partes real e imaginaria en cada uno de los taps que se estén evaluando.

Así mismo a la entrada del receptor tendremos la suma de todas las señales del medio inalámbrico y ruido blanco gaussiano (AWGN) que también será un factor de degradación de la señal recibida. Cabe recalcar que tanto en el transmisor como en el receptor se realizan los diferentes ajustes de potencia de señal escalando las mismas para poder mantener siempre la

energía de símbolo igual a uno y demás consideraciones que serán analizadas en la evaluación de los resultados y sus efectos.

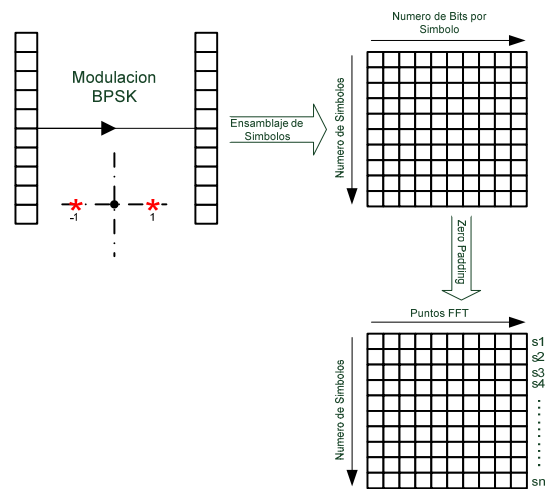


Figura 3.2 Mapeo y Formación de Símbolos

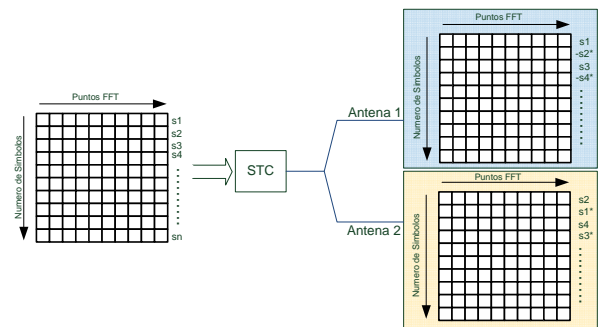


Figura 3.3 Codificación de Alamouti

Recuperados los símbolos de la codificación de Alamouti con el esquema de detección de Alamouti se termina de desensamblar la señal retirando las componentes donde se agregaron ceros y luego se realiza la demodulación BPSK para luego recuperar la forma de matriz binaria del tamaño de la imagen.

4. Interfaz Gráfica de Usuario y Simulador

El sistema desarrollado servirá de soporte didáctico para los cursos de Comunicaciones Inalámbricas, en general, los estudiantes de dicho curso no están familiarizados con sistemas de procesamiento actuales como OFDM o técnicas físicas de propagación como MIMO por lo que el crear una herramienta gráfica servirá no solo para afianzar conocimientos sino para introducir estas técnicas y también para crear interés y aumentar la capacidad educacional y de investigación en ESPOL.

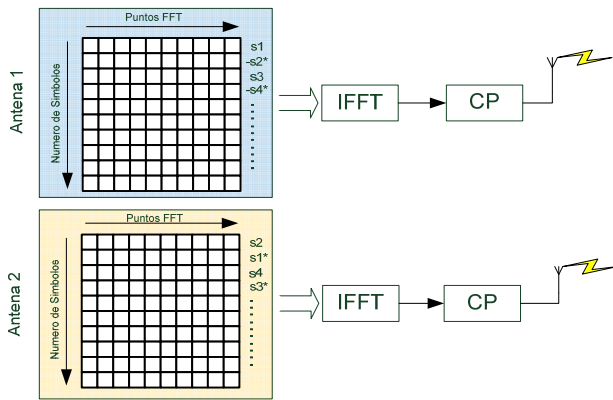


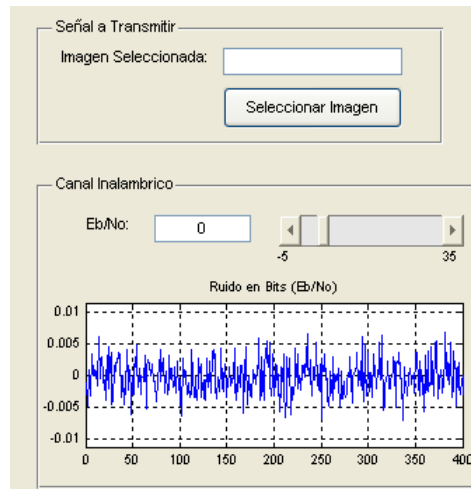
Figura 3.4 Modulación OFDM

El sistema se enfoca en demostrar y evaluar el rendimiento de la ganancia obtenida en fiabilidad del sistema por el uso del esquema de Alamouti en un sistema inalámbrico, la idea de mantener las características y el uso del sistema de una manera sencilla permitirá enfocarse en la aplicación de la teoría ya demostrada en la Sección 2.

En la figura 4.1 (a) se muestra la interfaz gráfica desarrollada para el sistema, en detalle en (b) se muestra la interfaz creada para que los usuarios puedan seleccionar la imagen a usar en la simulación. El sistema también permite cambiar la relación de ruido lo que permitirá evaluar el sistema a diferentes SNR y entender el efecto de estas variaciones, en conjunto con los controles para variar la SNR se encuentra una representación gráfica del ruido así los usuarios podrán identificar gráficamente la cantidad de ruido que está afectando el sistema.

En (c) se muestra las variaciones que se pueden realizar al canal inalámbrico, existen controles para incluir o no el efecto multirayectoria en el canal, en caso de que el efecto multirayectoria esté incluido se puede variar el número de taps del canal, el simulador identificará entre desvanecimiento plano y desvanecimiento selectivo en frecuencia y mostrará al usuario un mensaje indicando que tipo de desvanecimiento se está simulando.

(a) GUI del Simulador



(b) Selección de Señal y Nivel de ruido,

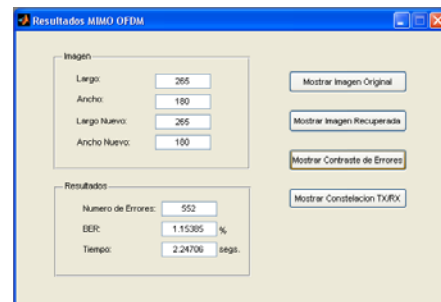
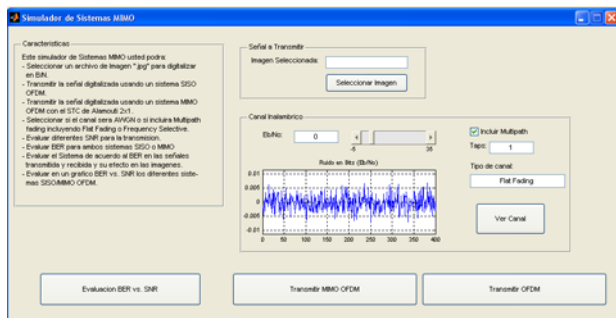


(c) Asignación de Parámetros para Desvanecimiento Multicamino.

Figura 4.1

Al momento de usar los controles de transmisión mostrados en la Figura 4.1 (a), empieza la simulación y luego de terminar el procesamiento en transmisor y en receptor se activa un panel adicional para mostrar los resultados, en la Figura 4.2 esta la captura de pantalla de dicho panel.

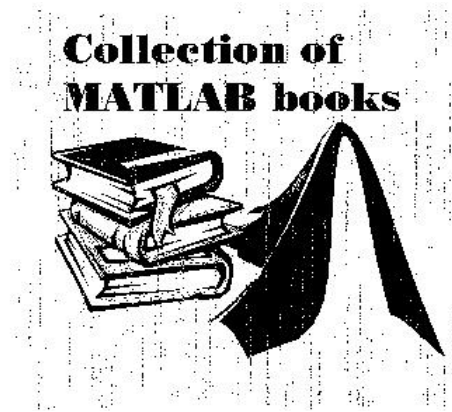
Se puede identificar que el panel de resultados muestra detalles de la digitalización de la imagen, los controles correspondientes para mostrar la imagen original digitalizada, la imagen recuperada luego del proceso de detección en el receptor y un botón adicional que muestra una imagen de contraste para identificar los errores entre la imagen original y la recuperada por el sistema.



(a) Panel de Resultados MIMO OFDM,

Resultados	
Numero de Errores:	1756
BER:	3.67057 %
Tiempo:	0.111691 segs.

(b) OFDM detalle de resultados
Figura 4.2



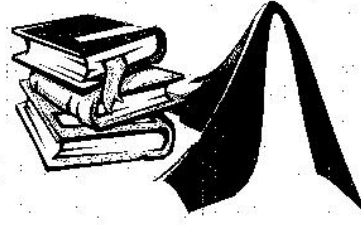
(a) Imagen recuperada con OFDM

Collection of MATLAB books



(a) Imagen a color original JPG,

Collection of MATLAB books



(b) Imagen recuperada MIMO OFDM 2x1.

Collection of MATLAB books

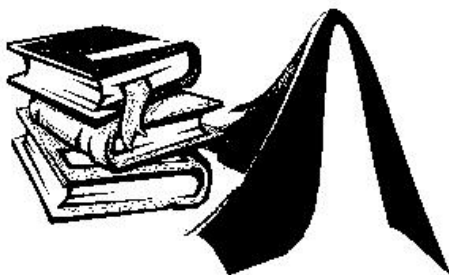


Figura 4.3 (b) B/W Imagen digitalizada.

Collection of MATLAB books

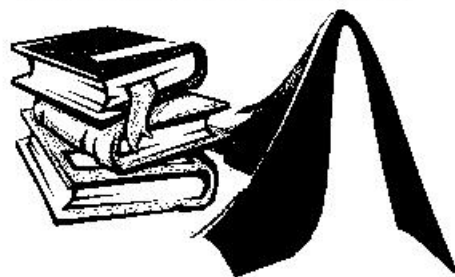


Figura 4.4 (c) Imagen recuperada con MIMO OFDM

Alamouti – MRC 2X2

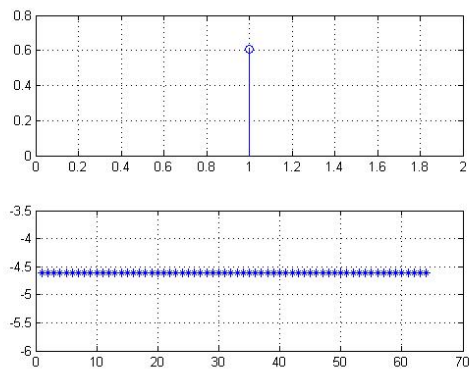
El primer botón permitirá ver la imagen original que fue digitalizada y que es la señal de entrada del sistema, como ejemplo en la Figura 4.3 (a) se muestra una imagen sin digitalizar en formato JPG a color, en (b) se muestra la imagen digitalizada por MATLAB que corresponde al resultado del primer botón descrito anteriormente, como se explico en la Sección 3.1.1 ya en formato de matriz binaria, blanco y negro.

En la Figura 4.4 (a) se muestra la imagen recuperada con OFDM y en (b) la imagen recuperada con MIMO OFDM 2x1 y (c) la imagen recuperada con MIMO OFDM 2x2, resultados del control descrito en la sección anterior, donde gráficamente se puede evaluar la mejora significativa de usar MIMO versus no usarlo y los errores descritos son más perceptibles por mostrarse gráficamente en la señal de interés.

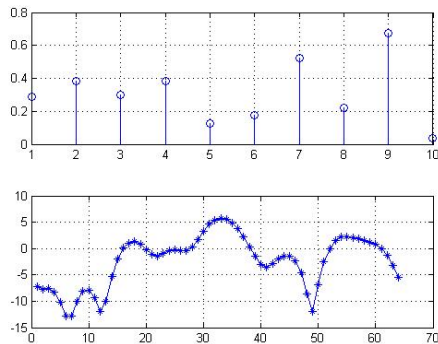
En la Figura 4.5 (a) se muestra la representación del canal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia para dicho caso se aprecia que el canal tiene

solo un tap en el dominio del tiempo por lo que el canal en el dominio de la frecuencia sufre desvanecimiento plano. En (b) se muestra en el dominio del tiempo un canal con 10 taps lo que representa tal como se aprecia que el canal sufre un desvanecimiento selectivo en frecuencia.

En la Figura 4.6 (a) se muestra la evaluación del sistema OFDM SISO con su curva BER, con línea azul, el sistema MIMO OFDM, línea celeste, ambos evaluados bajo un canal multitrayectoria con desvanecimiento plano, la curva en verde por otro lado corresponde a la evaluación del sistema sin el efecto multitrayectoria es decir solo bajo un canal AWGN, los usuarios podrán generar estas gráficas y poder reconocer el efecto de los diferentes parámetros en el sistema.



(a) Flat fading.



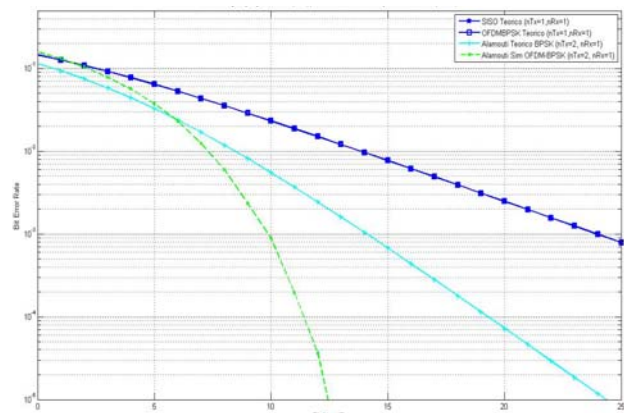
(b) Frequency Selective Fading,

Figura 4.5 Representaciones GUI del canal.

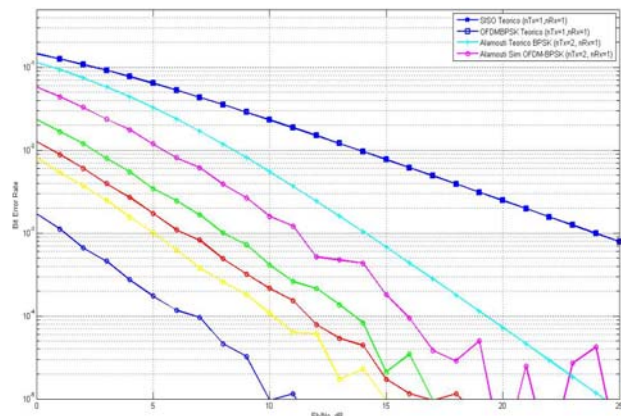
En la Figura 4.6 (b) se muestra el efecto de la corrección de potencia que existe para el canal y para las antenas transmisoras en el sistema MIMO OFDM, con un enfoque didáctico los usuarios podrán entender que para poder evaluar dos sistemas, en este caso el MIMO versus el SISO se deben considerar las mismas condiciones principalmente de potencia, en la grafica se muestra la variación de la curva al variar el numero de taps del canal y aparentemente el rendimiento de la curva BER para MIMO mejora, esto es sin considerar

la corrección de potencia necesaria para hacer dos sistemas equivalentes lo que se manifiesta con un grafico erróneo que nos llevaría a sacar conclusiones equivocadas.

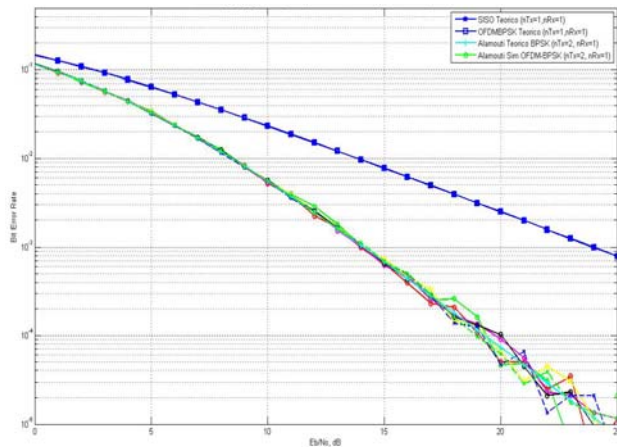
Los usuarios entonces pueden evaluar el sistema con los ajustes de potencia correctos y obtener la grafica de la Figura 4.6 (c) en donde se puede ver que el sistema MIMO OFDM sigue un comportamiento con la misma tendencia al cambiar las condiciones del canal de acuerdo al número de “taps”, esta gráfica llevará a los usuarios a las conclusiones correctas, con este ejemplo se logra demostrar las grandes capacidades didácticas de soporte que tendrá esta herramienta.



(a) OFDM SISO, MIMO OFDM Alamouti, AWGN MIMO OFDM



(b) MIMO OFDM sin ajuste de potencia para 1-10taps,



(c) MIMO OFDM con ajustes de Potencia de 1-10taps.
Figura 4.6

Duplicando el procedimiento desarrollado para el sistema 2x1, considerando desvanecimientos multitrayectoria independientes para la nueva antena y ruido AWGN independiente, luego de la detección de la señal para el procedimiento duplicado se combinan ambas señales detectadas proporcionando MRC.

Los resultados del proceso descrito en el párrafo anterior se verifican en la figura 4.7 en donde de acuerdo a las curvas BER del gráfico:

- La curva de Azul representa el sistema 1x1 SISO OFDM.
- La curva de Celeste representa el sistema 2x1 MISO OFDM con el esquema de Alamouti STC.
- La curva de Rojo representa al sistema 1x2 SIMO OFDM con el esquema MRC.

Las curvas detalladas anteriormente son graficadas de acuerdo a las formulas teóricas de (3) que describen ecuaciones para graficar BER vs. SNR para diferentes esquemas.

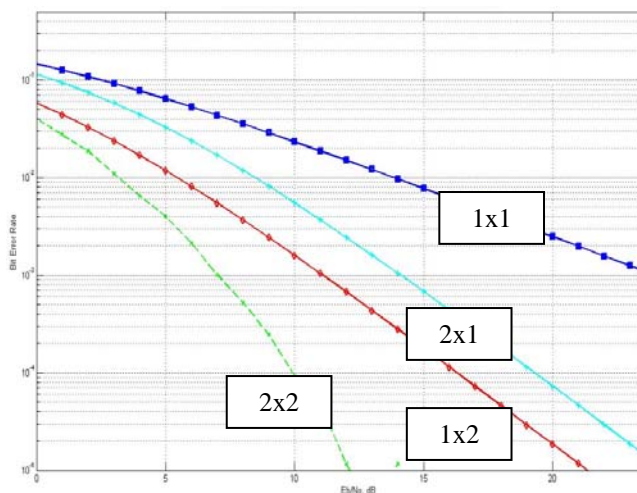


Figura 4.7: BER vs. SNR para 1x1, 2x1, 1x2, 2x2.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

Con el desarrollo de este trabajo se ha podido comprobar en base a la simulación que la técnica de detección MIMO de Alamouti; originalmente diseñada con la asunción de que el canal de transmisión está bajo desvanecimiento plano funciona también para canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia al combinarse exitosamente con el esquema OFDM que convierte un canal selectivo en frecuencia en una colección de canales planos.

Este trabajo ha cumplido su objetivo de servir de herramienta de soporte mediante la interfaz que se ha desarrollado, que será usada para ayudar a incrementar la capacidad de educación y de preparación de jóvenes investigadores pues con ejemplos sencillos y manteniendo un enfoque simple se logra identificar y evaluar un sistema complejo lo que se presenta atractivo para los estudiantes.

Por otro lado el sistema desarrollado se enfoca bastante de acuerdo a los resultados en evaluar el desempeño de la técnica MIMO y servir de guía en el entendimiento de estos conceptos, de una manera gráfica y práctica para los usuarios, así mismo variantes como las que correspondían al ajuste de potencia demuestran la gran capacidad de soporte a la educación en comunicaciones inalámbricas.

6. Referencias

- [1] A.B. Gershman, N. D. Sidiropoulos, *Space-Time Processing for MIMO Communications*, Wiley, 2005.
- [2] S. M. Alamouti, *A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications*, IEEE Journal on Select Areas in Communications, vol. 16, no. 8, Oct. 1998.
- [3] Y. Li and G. L. Stüber, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*, Springer, 2007.
- [4] H. Bolcskei, D. Gesbert, and A. J. Paulraj, *On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems*, IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 2, pp. 225-234, Feb. 2002.
- [5] MATLAB, Online Reference Guide, www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.shtml.
- [6] ANDREWS, J G., GHOSH A. y MUHAMED, R., *Fundamentals of Wimax*, Prentice Hall. 2007, páginas 149-190
- [7] FOSCHINI G. J. *Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas*. Bell Labs Technical Journal, 1(2):41-59, 1996.