

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Evaluación del Rendimiento de la Técnica Multi-Antena (MIMO)  
En Sistemas Inalámbricos OFDM mediante el desarrollo de un  
Simulador”

**TESIS DE GRADO**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

José Eduardo Córdova García

GUAYAQUIL – ECUADOR

2009

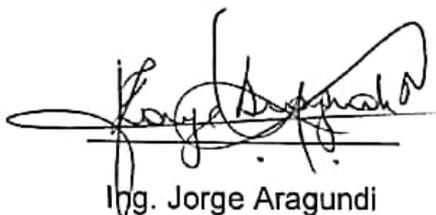
## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la fuerza que me ha dado durante toda mi vida, a mis padres pues a ellos les debo todo lo que he logrado, a mis hermanos y a mi Familia por su apoyo y comprensión, a mis amigos por ser la compañía y apoyo día a día, a la Ingeniera Rebeca Estrada por su confianza, paciencia y amistad, a las Autoridades de la FIEC y ESPOL por apoyar toda iniciativa que tuve durante mi carrera.

## DEDICATORIA

A mi Madre y a mi Padre quienes en cada paso de mi vida me han sabido brindar, apoyo, comprensión y todo cuanto fuera necesario incondicionalmente para lograr mis metas.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Jorge Aragundi

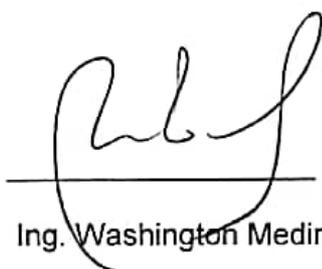
SUB-DECANO DE LA FIEC

PRESIDENTE



Ing. Rebeca Estrada

DIRECTOR DE TESIS



Ing. Washington Medina

VOCAL



Dr. Boris Ramos

VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

José Córdova

## RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema simulador de comunicaciones MIMO OFDM. Este proyecto propone desarrollar una herramienta que permita verificar de manera sencilla y didáctica el uso de ambas tecnologías de comunicaciones inalámbricas en donde se pueda evaluar el rendimiento comparativo entre sistemas que usan una sola antena (SISO) contra aquellos que usan más de una antena (MIMO), además verificar que OFDM permite obtener grandes prestaciones en sistemas MIMO, y en particular aplicar las mismas técnicas de detección que utilizando únicamente MIMO estarían bastante limitadas.

La herramienta propuesta se fundamenta en los conceptos de los algoritmos MIMO en especial aquellos que brindan diversidad espacial, el esquema de codificación espacio temporal de Alamouti es el elegido para brindar las prestaciones que este trabajo propone evaluar. El sistema desarrollado se enfoca en mejorar la fiabilidad de los sistemas OFDM en términos de la tasa de error de bit y se presentan los resultados de la evaluación del sistema mejorado mediante simulaciones gráficas en base a señales de imágenes transmitidas mostrando de una manera simple las prestaciones y ganancias que se obtuvieron en la calidad del sistema desarrollado.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MODELO DE SEÑAL EN SISTEMAS INALAMBRICOS OFDM .....</b>	<b>4</b>
1.1 Propagación de Señal en Medios Inalámbricos .....	5
1.1.1 Desvanecimiento de señal multitrayectoria.....	6
1.1.2 Modelo de Desvanecimiento .....	8
1.1.3 Modelo de Señal bajo Desvanecimiento .....	9
1.1.4 Modelo discreto del canal multitrayectoria .....	10
1.1.5 Consideraciones Adicionales .....	12
1.2 Modulación Ortogonal por División de Frecuencia .....	13
1.2.1 Modelo de Sistema OFDM.....	14
1.2.1.1 FFT/IFFT .....	15
1.2.1.2 Modelo del canal OFDM .....	18
1.2.1.3 Símbolo OFDM e Interferencia entre símbolos.....	20
1.2.1.4 Prefijo Cíclico .....	20
1.2.2 Aplicaciones OFDM .....	21

1.2.2.1	Símbolo OFDM en 802.11a.....	22
1.2.2.2	OFDM en 802.11n .....	24
1.2.3	OFDM y Desvanecimiento .....	25
1.2.4	Sumario de Ventajas de OFDM .....	26
<b>2.</b>	<b>TECNICAS MULTIANテナ .....</b>	<b>28</b>
2.1	Sistemas MIMO aplicados a Comunicaciones Inalámbricas.....	28
2.2	Clasificación de Técnicas MIMO.....	29
2.3	Diversidad.....	30
2.4	Modelo de Señal MIMO .....	32
2.4.1	Modelo del Canal MIMO.....	34
2.4.2	Paralelización de Canales MIMO .....	35
2.4.3	Multiplexación vs Diversidad .....	37
2.4.4	Consideraciones de Capacidad del canal .....	38
2.5	Multiplexación Espacial .....	40
2.6	Diversidad Espacial.....	43
2.6.1	Diversidad en Transmisión .....	44
2.6.2	Codificación Espacio-Temporal y Codificación de Alamouti .....	48
2.6.3	Diversidad en Recepción .....	53
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA MIMO OFDM .....</b>	<b>58</b>
3.1	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA .....	58
3.1.1	Especificaciones de la señal a Transmitir .....	59
3.1.2	Especificaciones del Transmisor .....	60

3.1.3	Especificaciones del Canal.....	62
3.1.4	Especificaciones Receptor.....	62
3.2	ANALISIS DE PROCESOS DEL SISTEMA.....	63
3.2.1	Proceso de Digitalización de la Señal a Transmitir .....	63
3.2.2	Descripción del proceso de transmisión.....	66
3.2.3	Descripción del canal en el sistema.....	71
3.2.4	Recepción de la señal MIMO OFDM}.....	73
<b>4.</b>	<b>ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1	Descripción de la Interfaz.....	76
4.2	Evaluación del Sistema basado en Imágenes transmitidas y recibidas.....	81
4.3	Evaluación BER vs. SNR variando el Canal.....	85
4.4	Evaluación BER vs. SNR variando el numero de antenas.....	94
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
	<b>APÉNDICES.....</b> ¡Error! Marcador no definido.	
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Efectos del medio inalámbrico en señal. ....	6
<b>Figura 1.2:</b> Representación de canal multitrayectoria .....	7
<b>Figura 1.3:</b> Perfil de Retardo de Potencia (2).....	8
<b>Figura 1.4:</b> Diagrama de bloques modelo de señal en canal inalámbrico. ....	9
<b>Figura 1.5:</b> Modelo del canal como Filtro FIR de 4-taps. ....	12
<b>Figura 1.6:</b> Uso del Espectro FDM y OFDM 2). ....	14
<b>Figura 1.7:</b> Diagrama de Bloques del Sistema OFDM con FFT (2). ....	17
<b>Figura 1.8:</b> Modelo del canal OFDM (2).....	19
<b>Figura 1.9:</b> Inserción del Prefijo Cíclico (3) .....	21
<b>Figura 1.10:</b> Símbolo OFDM en el dominio de la Frecuencia de (3).....	23
<b>Figura 1.11:</b> Inserción del prefijo Cíclico. ....	24
<b>Figura 1.12:</b> Símbolo OFDM 802.11a en el dominio del tiempo (14).....	24
<b>Figura 2.1:</b> Envoltente de Desvanecimiento en Diversidad en Recepción 1x2 (3).....	32
<b>Figura 2.2:</b> Representación de Sistema MIMO Matricial.....	32
<b>Figura 2.3</b> Representación gráfica de Sistema SIMO y MISO.....	33
<b>Figura 2.4:</b> Representación de Paralelización de un canal MIMO con CSIT. .....	37
<b>Figura 2.5:</b> Relaciones de Capacidad del Canal para Diversidad (17) .....	39

<b>Figura 2.6:</b> Relación de Capacidad del canal para Multiplexación Espacial (17).....	40
<b>Figura 2.7:</b> Esquema MIMO de Multiplexación Espacial (17) .....	41
<b>Figura 2.8:</b> Diversidad en Transmisión con Realimentación para CSI (8)....	45
<b>Figura 2.9:</b> Diversidad en Transmisión con Salto de Antenas (8).....	46
<b>Figura 2.10:</b> Diversidad en Transmisión con Codificación del canal (8).....	47
<b>Figura 2.11:</b> Diversidad en Transmisión con Retardo de Transmisión (8)....	48
<b>Figura 2.12:</b> Esquema de Alamouti (8).....	50
<b>Figura 2.13:</b> Diversidad en Recepción: a) SC, b) MRC, c) EGC .....	54
<b>Figura 2.14:</b> BER vs. SNR Diversidad en Recepción (2).....	56
<b>Figura 3.1:</b> Proceso de Digitalización de la Imagen a partir de Archivo. ....	64
<b>Figura 3.2:</b> Modulación de la señal y Ensamblado de símbolos.....	67
<b>Figura 3.3:</b> Proceso de Codificación de Alamouti sobre símbolos OFDM. ....	68
<b>Figura 3.4:</b> Modulación de los símbolos de Alamouti.....	70
<b>Figura 4.1:</b> Interfaz Gráfica del Simulador.....	77
<b>Figura 4.2:</b> Representación GUI de canales. ....	79
<b>Figura 4.3:</b> Panel de Resultados, .....	80
<b>Figura 4.4:</b> Proceso de digitalización de la Imagen comparativa.....	82
<b>Figura 4.5:</b> Comparativa de Imágenes luego de Simulación .....	84
<b>Figura 4.6:</b> Contraste para identificar gráficamente errores.....	85
<b>Figura 4.7:</b> BER vs. SNR Alamouti-OFDM, SISO OFDM .....	86
<b>Figura 4.8:</b> BER vs SNR para diferente número de taps sin ajuste .....	88

<b>Figura 4.9:</b> BER vs SNR para diferente número de taps con ajuste.....	89
<b>Figura 4.10:</b> Panel de resultados Alamouti-OFDM a 0dB en canal: a) AWGN y b) Flat Fading.....	90
<b>Figura 4.11:</b> Panel de resultados Alamouti-OFDM a 5dB en canal: a) AWGN y b) Flat Fading.....	91
<b>Figura 4.12:</b> BER vs. SNR para OFDM SISO en canal AWGN y Flat Fading. .....	94
<b>Figura 4.13:</b> Esquema de Alamouti 2x2 (8).....	96
<b>Figura 4.14:</b> BER vs. SNR para 1x1, 2x1, 1x2, 2x2. ....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I:</b> Esquema de Alamouti en Tiempo y Espacio .....	49
<b>Tabla II:</b> Recepción en dos instantes de Tiempo.....	51
<b>Tabla III:</b> Especificaciones de la señal entrada. ....	59
<b>Tabla IV:</b> Especificaciones del Transmisor MIMO .....	61
<b>Tabla V:</b> Especificaciones OFDM .....	61
<b>Tabla VI:</b> Especificaciones del Canal.....	62
<b>Tabla VII:</b> Especificaciones del Receptor .....	63
<b>Tabla VIII:</b> Tabla de Evaluación Alamouti OFDM .....	93
<b>Tabla IX:</b> Tabla de Evaluación SISO OFDM.....	93
<b>Tabla X:</b> Evaluación 1x1, 2x1, 2x2.....	99

## ABREVIATURAS

AOA	Angle of Arrival
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BLAST	Bell Labs Layered Space Time
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CP	Cyclic Prefix
CSI	Channel State Information
CSIT	Channel State Information at Transmitter
D - BLAST	Diagonal Bell Labs Layered Space Time
DFT	Discrete Fourier Transform
DOA	Direction of Arrival
EGC	Equal Gain Combining
FDM	Frequency Division Multiplexing

FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
FPGA	Field Programmable Gate Array
GUI	Graphic User Interface
H - BLAST	Horizontal Bell Labs Layered Space Time
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Inter Symbol Interference
LDPC	Low Density Parity Code
LOS	Line Of Sight
MC	Multi Carrier
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
ML	Maximum Likelihood
MMSE	Minimum Mean Square Error
MRC	Maximum Ratio Combining
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSTBC	Orthogonal Space Time Block Coding
PDP	Power Delay Profile
RF	Radio Frequency
RGB	Red Green Blue
SC	Selection Combining
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SM	Spatial Multiplexing
SNR	Signal to Noise Ratio
STBC	Space Time Block Coding
STC	Space Time Coding
V - BLAST	Vertical Bell Labs Layered Space Time
ZF	Zero Forcing

# INTRODUCCIÓN

El uso de más de una antena del lado del transmisor o en el receptor se ha vuelto una técnica de capa física bastante estudiada alrededor del mundo, pues teóricamente brinda grandes prestaciones principalmente como solución para las necesidades de los sistemas Inalámbricos de “Próxima Generación” entre las cuales podemos citar: necesidad por tener una alta tasa de datos en el sistema y una alta calidad del enlace.

Técnicas que se basen en explotar los recursos disponibles tanto en el dominio del tiempo como en el manejo del rango de frecuencias disponibles en un sistema inalámbrico han sido de gran interés y estudio durante mucho tiempo sin embargo en los últimos años se ha brindado un gran interés por hacer de la “diversidad espacial” explicada en el Capítulo 2 un gran recurso por investigar y explotar con fines de mejorar o brindar nuevas aplicaciones a los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

La idea básica de un sistema de comunicación inalámbrico MIMO es mejorar o incrementar aspectos que dependen de la capa física de un sistema como la tasa de datos, la tasa de errores por bit enviado usando múltiples antenas tanto en el Transmisor como en el Receptor.

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 grafica 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 el capítulo 1 se hace una revisión de modelos de propagación de señal en ambientes inalámbricos y la estructura de sistemas OFDM que serán la base para el diseño del sistema simulador.

En el capítulo 2 se analizan los diferentes esquemas o técnicas de transmisión MIMO creando un contexto en donde se detalla en especial la codificación de Alamouti y su esquema de detección en el receptor dado que el mencionado esquema será el seleccionado para ser simulado.

En el capítulo 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 de recepción de acuerdo a los conceptos introducidos en los capítulos 1 y 2.

En el capítulo 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.

# Capítulo 1

## **MODELO DE SEÑAL EN SISTEMAS INALAMBRICOS OFDM**

El medio inalámbrico para la transmisión de señales ocasiona varios efectos en las mismas, normalmente estos efectos producen degradación que se puede medir en términos generales por el nivel de señal en términos de la potencia de la misma, dichos efectos son muchas veces variables dependientes de la distancia a la cual se está propagando la señal y a las condiciones del medio.

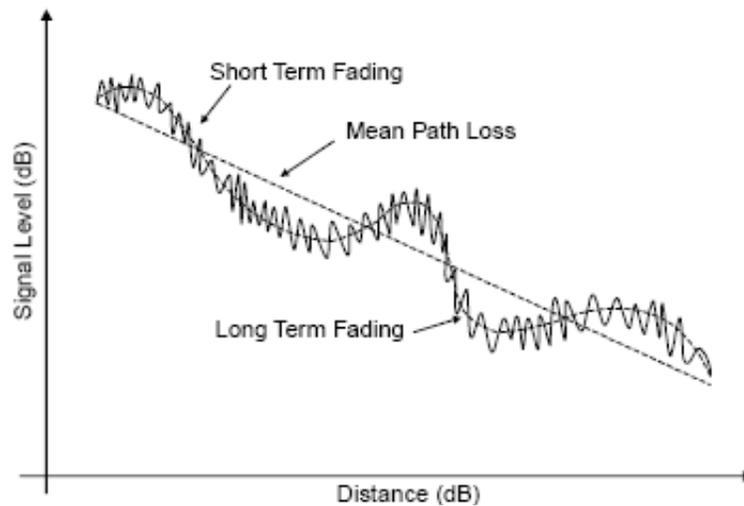
En el caso del medio inalámbrico el clima, la temperatura, la cantidad de objetos en el camino de propagación, la distancia entre las antenas transmisora y receptora entre otros pueden ser agentes que contribuyan constructivamente o de manera dañina al desempeño del sistema en términos del ya mencionado nivel de señal.

## 1.1 Propagación de Señal en Medios Inalámbricos

El efecto del medio inalámbrico en la propagación de señales puede ser clasificado o descrito por dos modelos de la variación del nivel de señal ocasionado por el canal.

- Modelos de gran escala, explican el comportamiento de la potencia a distancias mucho mayores que la longitud de onda, entre estos modelos tenemos el modelo de Espacio Libre, Okumura, Hata, Log-distancia y log-normal.
- Modelos de pequeña escala, explican el comportamiento en distancias comparables a la longitud de onda, entre los que se destacan el desvanecimiento que describe cambios significativos y muchas veces rápidos de la señal en distancias o instantes de tiempo cortos y multitrayectoria y el efecto Doppler causado por el movimiento.

En la Figura 1.1 se muestra un gráfico que representa el efecto del canal inalámbrico en el nivel de una señal transmitida por el mismo versus la distancia a la cual se transmite, en el mismo podemos identificar el efecto de los dos tipos de desvanecimiento descritos anteriormente.

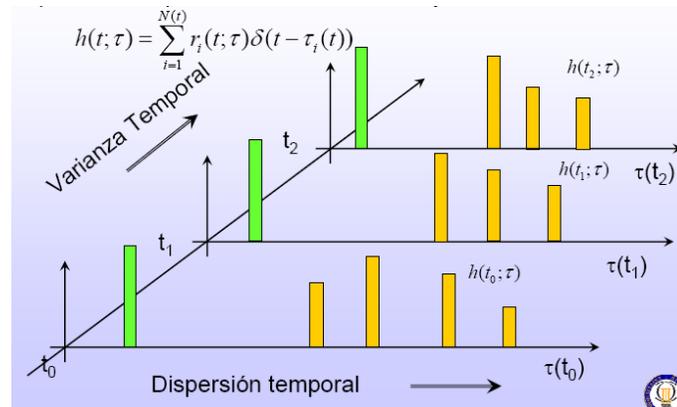


**Figura 1.1:** Efectos del medio inalámbrico en señal.

### 1.1.1 Desvanecimiento de señal multitrayectoria

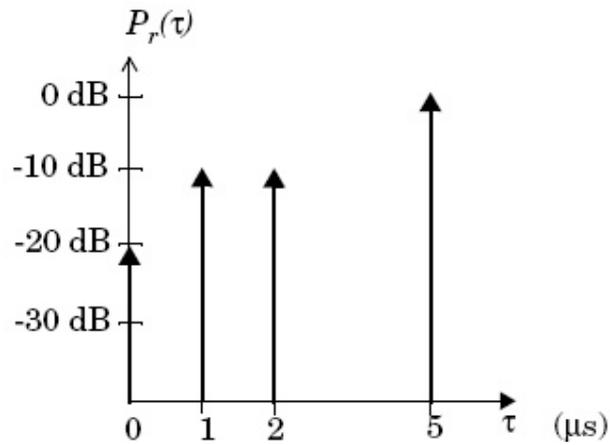
Un canal multitrayectoria presenta una varianza temporal y una dispersión temporal, como se muestra en la Figura 1.2 en la cual se describe como cada respuesta del canal será variante en el tiempo, por lo que aparece otra variable además del tiempo la que representará dicha variación de la respuesta al impulso del canal.

En los canales con desvanecimiento multitrayectoria dos parámetros importantes corresponden a la Dispersión máxima del retardo en el análisis en el dominio del tiempo y a su correspondiente ancho de banda coherente, al análisis en el dominio de la frecuencia.



**Figura 1.2:** Representación de canal multirrayectoria

En este tipo de canales en lugar de medir la respuesta al impulso en un instante de tiempo se mide el nivel de potencia en función del retardo, lo que se obtiene es un gráfico como el de la figura 1.3 llamado también “Perfil de Retardo de Potencia” (Power Delay Profile), su transformada de Fourier representará la respuesta en Frecuencia del canal.



**Figura 1.3:** Perfil de Retardo de Potencia (2)

Por simplicidad no se considerarán los efectos de retrasos Doppler para el tratamiento de señal en este trabajo, así el perfil de retardo de potencia y el Espectro Doppler del canal pueden ser separados y no existirá la necesidad de analizar los emplazamientos Doppler (1).

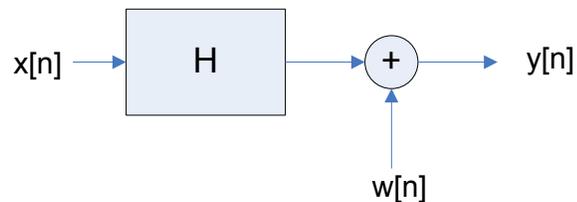
### 1.1.2 Modelo de Desvanecimiento

El efecto del desvanecimiento en un canal multitrayectoria puede ser modelado haciendo uso de dos distribuciones estadísticas muy conocidas para este tipo de aplicación, la distribución Rayleigh y la distribución Rician.

Se usa una distribución Rayleigh para caracterizar el comportamiento de sistemas inalámbricos donde la componente de propagación de señal directamente entre el transmisor y el receptor, la componente de línea de vista LOS – Line of sight, es mucho menos significativa que las componentes de reflexiones de multitrayectoria, a este tipo de ambientes también se lo conoce como NLOS, sin línea de vista, por sus siglas en inglés Non Line of Sight.

Por otro lado se usa una distribución Ricean para caracterizar aquellos medios inalámbricos donde la componente LOS es la componente más significativa para la transmisión, será de particular interés para este trabajo el análisis del ambiente sin línea de vista por lo que se usará la distribución Rayleigh para modelar el canal.

### 1.1.3 Modelo de Señal bajo Desvanecimiento



**Figura 1.4:** Diagrama de bloques modelo de señal en canal inalámbrico.

En base a un modelo de señal como el planteado en la Figura 1.4, en donde:

- $x[n]$ : Señal a la salida del transmisor o entrada del sistema
- $y[n]$ : Señal a la entrada del receptor o Salida del sistema
- $w[n]$ : Es el ruido AWGN que se encuentra a la entrada del receptor

El canal puede ser considerado como un coeficiente aleatorio que se multiplica a la señal  $x(n)$  de entrada, una ecuación que representa al sistema será:

$$y(n) = h \cdot x(n) + w(n) \quad (1.1)$$

Donde  $h$  se puede modelar como un coeficiente - variable aleatoria Rice, Rayleigh, Nakagami-m, etc.

#### 1.1.4 Modelo discreto del canal multitrayectoria

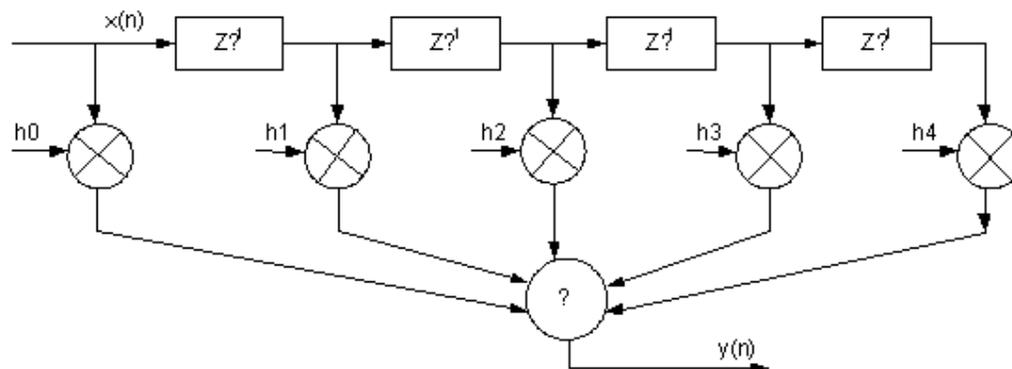
En (2) se demuestra que el canal en desvanecimiento multitrayectoria puede modelarse como un filtro lineal de Respuesta Finita al Impulso, FIR, como el mostrado en la Figura 1.5.

Este filtro FIR describirá un sistema discreto en donde el canal inalámbrico multitrayectoria tendrá  $N$  caminos de propagación, cada uno con su propio retardo y su ganancia de atenuación por camino, es decir que en el receptor se reciben varias copias retardadas de la señal cada una multiplicada por un coeficiente aleatorio diferente como se estableció en la sección anterior.

A cada uno de los  $N$  factores se los suele llamar “taps” del canal, normalmente estos taps o trayectorias son variables aleatorias independientes entre si

Se puede definir de acuerdo al número  $N$  dos tipos de canales:

- En el caso que  $N = 1$  el canal es llamado un canal con Desvanecimiento plano en Frecuencia (Frequency-flat fading).
- Por otro lado un canal con  $N > 1$  experimenta un Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia (Frequency Selective Fading).



**Figura 1.5:** Modelo del canal como Filtro FIR de 4-taps.

En la ecuación (1.2) se modela la señal recibida que es transmitida por un canal bajo el efecto multitrayectoria, “ $l$ ” representa al número de trayectoria entre el receptor y el transmisor, cada uno de los factores  $h(l)$  de la ecuación (2) corresponden a los  $N$  taps descritos anteriormente.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \cdot x(n-l) + w(n) \quad (1.2)$$

### 1.1.5 Consideraciones Adicionales

No se considerarán dispersiones Doppler en el análisis de este trabajo pues se asume que el sistema inalámbrico es fijo por lo que no existe

movimiento entre el transmisor y el receptor que causaría desplazamientos Doppler, por lo que el análisis del Espectro Doppler no es considerado, siendo este totalmente independiente del análisis de propagación multitrayectoria como ya se demostró en la sección 1.1.1.

## **1.2 Modulación Ortogonal por División de Frecuencia**

La Modulación Ortogonal por División de Frecuencias (OFDM) es un tipo de modulación Multi-portadora (Multicarrier – MC) que tal como su nombre lo dice usa más de una portadora para transmitir información, es decir que los datos son modulados por diferentes sub-portadoras a diferentes frecuencias.

A continuación se muestra, un esquema tradicional MC en la parte superior de la Figura 1.6 que se puede considerar, como FDM, Frequency Division Multiplexing, en cambio en la parte inferior de la misma Figura se muestra como OFDM hace un uso eficiente del espectro pues en el dominio de la frecuencia las sub-portadoras si se solapan entre ellas ahorrando considerablemente el espectro.

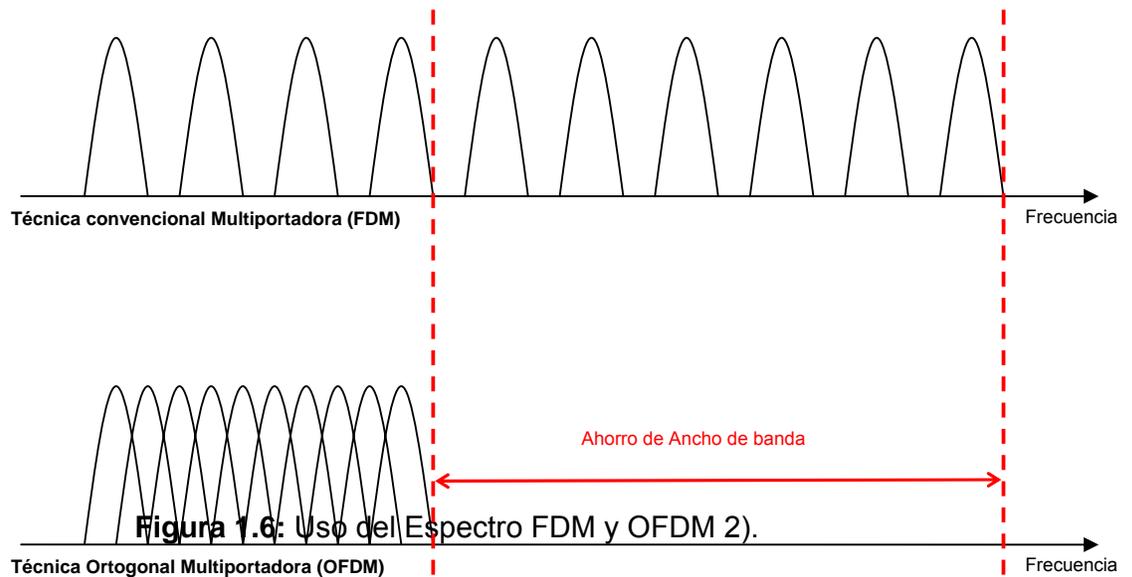


Figura 1.6: Uso del Espectro FDM y OFDM 2).

### 1.2.1 Modelo de Sistema OFDM

En la Figura 1.7 se muestra un diagrama de bloques de un sistema OFDM, en el podemos apreciar que los símbolos que entran al sistema son convertidos en sub-tramas paralelas, este proceso de separación o división en sub-símbolos o bloques de información es llevada a cabo por un convertidor Serie-Paralelo.

Los símbolos a la entrada del convertidor Serie-Paralelo son recibidos a una tasa de datos específica, estos símbolos son divididos en sub-cadenas o tramas de símbolos cada una de ellas con una menor tasa de datos al final todos estos símbolos de menor tasa de datos se suman para poder obtener una tasa de datos equivalente a la original.

### 1.2.1.1 FFT/IFFT

La Técnica de OFDM fue propuesta por primera ocasión por Chang de Laboratorios Bell en 1966, en 1971 Weinstein y Ebert propusieron el uso de la FFT para implementar el sistema de manera práctica. Sin embargo, la llegada de procesadores digitales de señal rápidos y FPGAs en los 90's ha propuesto la oportunidad real de efectivamente implementar sistemas OFDM, como se puede ver en la Figura 1.7.

Teniendo separados los símbolos de datos se necesitará modular dichos símbolos de acuerdo al número de portadoras, esto es posible gracias a la IFFT que como se muestra en la ecuación (1.3) permite sumar los distintos símbolos modulados por cada una de las frecuencias portadoras.

$$\hat{X}(k) = \sum_{n=0}^{N_s-1} \hat{x}(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N_s}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (1.3)$$

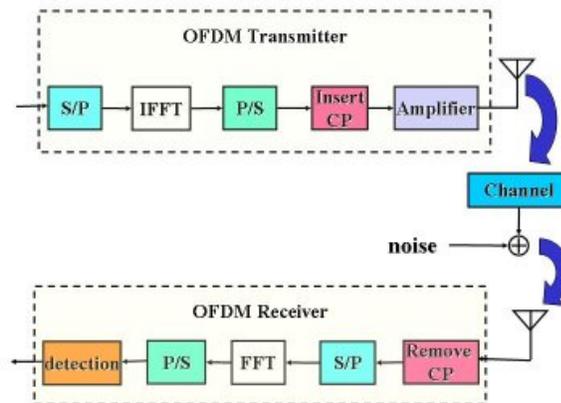
Al estar cada una de las sub-tramas sin modular siendo procesadas por la IFFT cuya función es devolver la señal al dominio del tiempo, se

considerarán las sub-tramas como una componente de señal en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 1.7, se ilustra como el bloque IFFT opera sobre esos símbolos obteniendo la señal en el dominio del tiempo, esta señal es la que se transmitirá sobre el canal.

El receptor entonces recibirá la señal en el dominio del tiempo y realizará sobre la misma la operación FFT para obtener las componentes espectrales correspondientes por la demodulación de las sub-portadoras, los datos se vuelven a tomar de manera serial, por un convertidor Paralelo-Serie, para obtener y recuperar los símbolos originales que fueron ingresados al sistema OFDM.

$$\hat{x}(n) = \frac{1}{N_S} \sum_{k=0}^{N_S-1} \hat{X}(k) e^{-j \frac{2\pi nk}{N_S}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_S - 1 \quad (1.4)$$



**Figura 1.7:** Diagrama de Bloques del Sistema OFDM con FFT (2).

En la Figura 1.7 se aprecia que luego que los símbolos son separados para ser transmitidos por cada una de las sub-portadoras una manera simplificada de implementar OFDM es con el uso de dos bloques básicos:

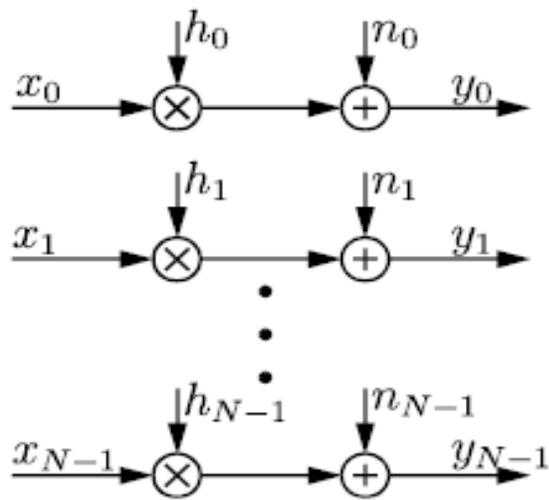
- Bloque IFFT: encargará de mantener la Ortogonalidad en cada subportadora y en formar el símbolo OFDM mostrado anteriormente, dichas sub-portadoras tendrán la mínima separación en frecuencia que permita mantener la Ortogonalidad de las mismas en el dominio del tiempo.

- Bloque CP: Prefijo cíclico se usa para que en presencia de la interferencia entre símbolos un prefijo redundante se agregue a la salida de cada operación IFFT en el transmisor.

### **1.2.1.2 Modelo del canal OFDM**

En el modelo multiportadora se puede considerar que a la salida del modulador se conservan las  $L$  tramas de datos, es decir no se vuelve a serializar las tramas, donde de acuerdo al número de subportadoras, las  $L$  tramas de datos deberán ser enviadas por  $L$  sub-canales paralelos, estos canales en el modelo de canal OFDM son ortogonales.

En cada sub-canal tendremos una tasa de datos mucho más baja que la tasa de datos total del sistema haciendo que el requerimiento de ancho de banda para cada canal sea mucho menor que el ancho de banda total del sistema.



**Figura 1.8:** Modelo del canal OFDM (2).

En la figura 1.8 se puede ver el modelo equivalente de los canales en el dominio de la frecuencia cada uno con desvanecimiento plano. Como se puede ver el modelo del canal en el dominio de la frecuencia consiste de N símbolos de datos paralelos que van a través de N canales paralelos con desvanecimiento plano independiente. Ruido AWGN es añadido en el receptor y los símbolos son serializados en el vector  $y$ .

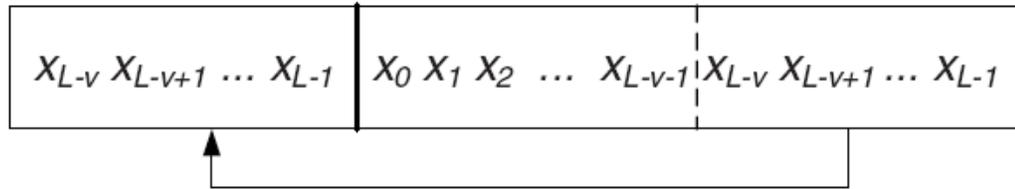
La operación de FFT se realizará primero en el dominio del tiempo sobre los taps del canal asumiendo estimación en el tiempo perfecta y no error de frecuencia. Adicionalmente en este modelo se espera que el canal sea estático durante el tiempo de duración de la trama o símbolo OFDM y que haya perfecto conocimiento del canal.

### 1.2.1.3 Símbolo OFDM e Interferencia entre símbolos

El conjunto de  $L$  símbolos que serán transmitidos y modulados por cada una de las sub-portadoras serán llamados “símbolos OFDM”, donde cada uno tendrá una duración de  $T$  segundos donde  $T = LT_s$ , siendo  $T_s$  la duración de un símbolo original antes del convertidor S/P, para la transmisión entre símbolos OFDM se deberá mantener un “intervalo de guarda” que se introducirá para mantener los símbolos independientes entre ellos, en (3) se establece que en el caso de que el tiempo de guarda sea el adecuado entonces cada símbolo OFDM solo se podrá interferir con el mismo, es decir que teniendo  $T_g$  lo suficientemente grande se garantizará que no haya interferencia entre símbolos OFDM secuenciales.

### 1.2.1.4 Prefijo Cíclico

En (3) se demuestra que para tener un canal libre de ISI el canal debe proveer una convolución circular como operación de la respuesta al impulso del canal con la señal que se está transmitiendo, dicha señal debe ser una versión periódica de la misma para poder lograr dicha convolución circular.



**Figura 1.9:** Inserción del Prefijo Cíclico (3)

En OFDM se usa un “prefijo cíclico” previamente explicado en la sección 1.2.1.1 con el objetivo de crear la condición de convolución circular mencionada anteriormente.

El uso de un Prefijo Cíclico (CP) nos permitirá mitigar el efecto de la Interferencia Intersimbólica (ISI) pues cada Símbolo OFDM estará precedido por un CP que indicara el inicio y el fin de cada uno de los símbolos, el contenido de este CP será los últimos  $G$  símbolos contenidos en la trama OFDM (Ver Figura 1.9).

La duración de estos  $G$  símbolos corresponde al Tiempo de Guarda ( $T_g$ ) usado por el CP que con el tamaño adecuado como establece (3) se podrá mitigar completamente el efecto del ISI.

## 1.2.2 Aplicaciones OFDM

OFDM ha tenido gran aplicación en diferentes áreas como Digital Audio Broadcast (DAB), Digital Video Broadcast (DVB), Digital Subscriber Lines (DSL) y principalmente en estándares de Comunicaciones Inalámbricas como los 802.11a/g/n, HiperLan/2 y el conjunto de estándares 802.16 (2; 3; 4).

#### **1.2.2.1 Símbolo OFDM en 802.11a**

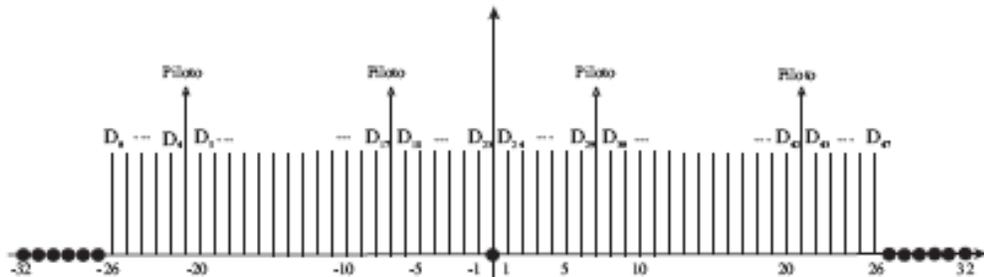
Como ejemplo de aplicación se revisarán las características que se usan para el estándar 802.11a específicamente a lo correspondiente al símbolo OFDM sin profundizar en detalles del estándar completo.

Las especificaciones del ensamblaje del símbolo OFDM entre otras:

- FFT e IFFT de 64 puntos.
- Los primeros 6 y los últimos 5 símbolos en el dominio de la frecuencia no son usados y se “rellenan” con cero.
- Índice de frecuencia 0 se usará con cero también.
- Los últimos 16 símbolos se usarán como Prefijo Cíclico.

El uso de los símbolos que se marcan como “cero” en el dominio de la frecuencia se utilizan para minimizar la necesidad del “ventaneo” necesario para evitar la interferencia entre canales, así mismo

eliminando el uso del índice de frecuencia cero nos ayuda a evitar el uso de la componente DC en la operación de muestreo.



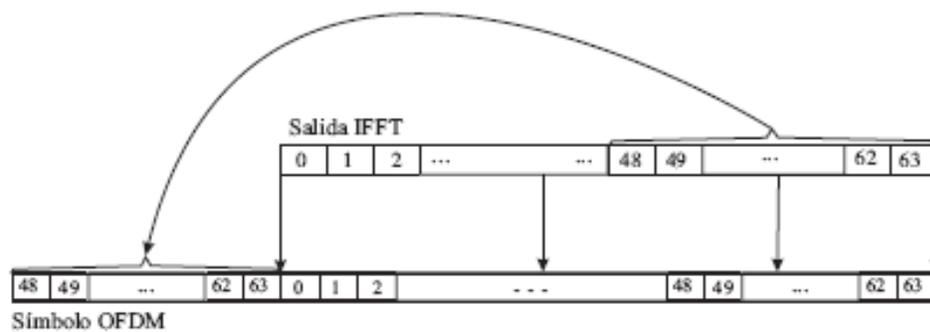
**Figura 1.10:** Símbolo OFDM en el dominio de la Frecuencia de (3).

De los 64 símbolos que estamos procesando luego de las consideraciones arriba expuestas tendremos las frecuencias de la -26 a la -1 y de 1 a 26, con un total de 52 componentes espectrales se podrán usar para transmisión.

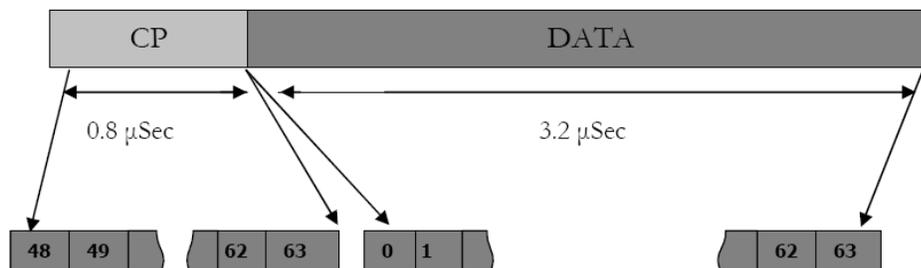
Adicionalmente el estándar 802.11a contempla el uso de las componentes en frecuencia con índice -21, -7, 7 y 21 como símbolos pilotos para estimación del canal (4), las consideraciones de las componentes espectrales que se han detallado se muestran en la Figura 1.10.

En la Figura 1.11 se muestra la inserción del prefijo cíclico en el símbolo OFDM y en la Figura 1.12 se muestra el símbolo OFDM en el dominio

del estándar 802.11a al finalizar la construcción del mismo, resaltando las componentes del prefijo cíclico y la duración en el dominio del tiempo.



**Figura 1.11:** Inserción del prefijo Cíclico.



**Figura 1.12:** Símbolo OFDM 802.11a en el dominio del tiempo (14).

### 1.2.2.2 OFDM en 802.11n

El próximo estándar 802.11n estará basado en OFDM y promete alcanzar tasas de datos de 600MBPS y superiores explotando las ganancias de usar algoritmos MIMO. Algunos de las propuestas para lograrlo son el uso de códigos LDPC de tasas de hasta 7/8, usar doble ancho de banda entre otros, el uso de OFDM en 802.11n se enfoca en las técnicas MIMO, descritas en el siguiente capítulo, lo que justifica el interés por evaluar a MIMO en conjunto con OFDM (15; 16).

### 1.2.3 OFDM y Desvanecimiento

El uso de una modulación Multi-portadora como OFDM implica que cada sub-portadora aproximadamente experimentará desvanecimiento plano como lo explica la sección 1.2.1.2, a pesar de que el sistema en conjunto sufra de desvanecimiento selectivo en frecuencia, en (3) se plantea que en el dominio del tiempo la duración del símbolo se ha incrementado  $T=LT_s$ , cada sub-portadora así haciendo  $L$  lo suficientemente grande garantiza que la duración del símbolo será más grande que la dispersión del retardo del canal logrando una comunicación sin ISI, esto por el lado del dominio del tiempo. Por otro lado en el dominio de la frecuencia el ancho de banda de cada canal se verá reducido por  $L$ ,  $B/L \ll B_c^1$ , condición que asegurará

---

<sup>1</sup> Ancho de banda coherente del canal descrito en detalle en (2)

desvanecimiento plano con el mismo efecto de no tener ISI en el canal, por lo tanto se establece que un sistema OFDM en un canal selectivo en frecuencia, por el uso y separación de las Sub-portadoras presentará un desvanecimiento plano en cada una de ellas, a pesar de tener un desvanecimiento selectivo en frecuencia en el sistema en general y por la asunción de que el largo del CP sea mayor o igual al largo de la respuesta en tiempo discreto del canal en banda base garantiza que el canal selectivo en frecuencia se convierta en un conjunto de canales planos en frecuencia.

#### **1.2.4 Sumario de Ventajas de OFDM**

A continuación se resumen ventajas del uso de la modulación OFDM descrita en este capítulo que son resaltadas y demostradas en (5):

- OFDM: es fácil de implementar en el dominio digital gracias al uso de la FFT.
- OFDM es eficiente en ancho de banda, dado que las subportadoras paralelas se solapan pero son ortogonales entre ellas sin causar interferencias.
- OFDM es robusto en desvanecimientos multitraectoria gracias al uso de un prefijo cíclico.

- OFDM no es susceptible a la mayoría de ruido impulsivo gracias a la transmisión paralela.
- OFDM provee gran flexibilidad en recursos dado que divide el canal de banda ancha en un número de sub-canales paralelos.

# Capítulo 2

## TECNICAS MULTIAN TENA

Los sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) son aquellos que basan sus modelos en múltiples entradas y múltiples salidas, en sistemas inalámbricos los sistemas MIMO serán aquellos que usan más de una antena tanto en el receptor como en el transmisor, estos sistemas usan por lo menos los  $N_t \times N_r$  canales físicos de propagación creados por las antenas introducidas al sistema, donde  $N_t$  y  $N_r$  son el número de antenas transmisoras y receptoras respectivamente,

### 2.1 Sistemas MIMO aplicados a Comunicaciones Inalámbricas

En sistemas de Múltiples antenas donde las antenas estén separadas correctamente estas no estarán correlacionadas y podrá ser tratado el sistema como múltiples sistemas de una antena receptora y una antena transmisora referidos como SISO (Single Input Single Output),

independientes.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas desde el punto de vista espacial, es decir, número de antenas usadas tanto en el transmisor como en receptor, pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- **Sistemas SISO:** Una Antena Transmisora (TX) y Una antena Receptora (RX)  $1 \times 1$ .
- **Sistemas MIMO:** Múltiples Antenas TX y Múltiples antenas RX  $N_t \times N_r$ .
- **Sistemas SIMO:** Una Antena TX y Múltiples antenas RX  $1 \times N_r$ .
- **Sistemas MISO:** Múltiples Antenas TX y Una antena RX  $N_t \times 1$ .

## 2.2 Clasificación de Técnicas MIMO

Las técnicas de Múltiples Antenas en sistemas inalámbricos pueden ser clasificadas en dos categorías, que describiremos brevemente a continuación:

- **Diversidad Espacial**, que consistirá en crear canales independientes en el espacio sin usar ancho de banda adicional.

- **Multiplexación Espacial**, crear múltiples canales en paralelo para procesar diferentes tramas de datos al mismo tiempo.

### 2.3 Diversidad

Diversidad es una técnica que consiste en transmitir la misma información en distintos canales para mejorar la confiabilidad de una señal ayudando a combatir los efectos del desvanecimiento y la interferencia.

Así, obtenemos ganancia por diversidad cuando ocurre la creación de múltiples canales independientes entre el transmisor y el receptor que tengan desvanecimientos independientes.

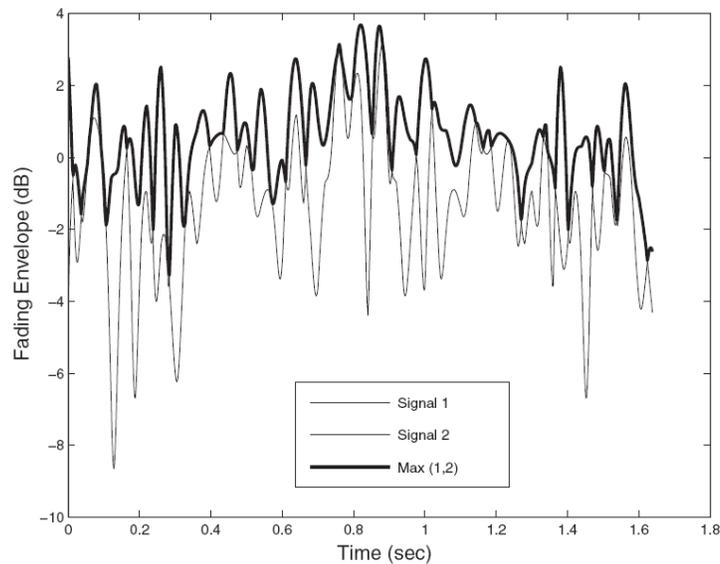
Para obtener diversidad en un sistema de comunicaciones inalámbricas contamos con:

- Diversidad Temporal
- Diversidad en Frecuencia
- Diversidad Espacial
- Diversidad de Polarización

Cada una de estas técnicas se basa en usar diferentes recursos (espacio, tiempo, frecuencia y polarización) para el sistema de transmisión/recepción.

El uso de varios canales de tiempo conlleva al aumento de diversidad temporal, el uso de varios canales de frecuencia significa el aumento de diversidad en frecuencia, de particular interés será entonces la diversidad Espacial que se basará en el aumento de las trayectorias de comunicación por ende el uso de múltiples antenas.

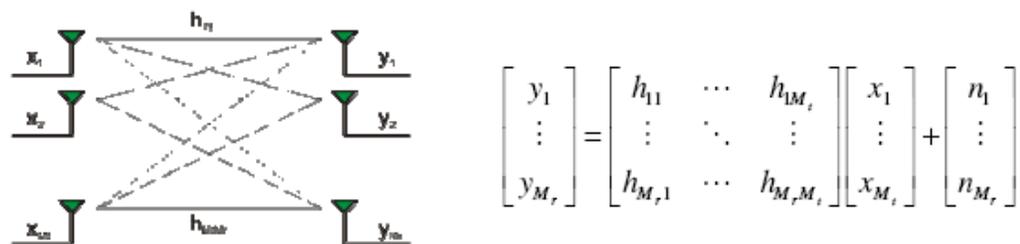
En la Figura 2.1 se puede identificar la envolvente de desvanecimiento en un sistema con dos antenas en el receptor, en el mismo se puede ver que tan solo con dos antenas y con una técnica de seleccionar la mejor señal entre las recibidas por las dos es suficiente para eliminar los desvanecimientos más pronunciados lo que proyecta a la diversidad espacial como una potente solución al desvanecimiento, esta diversidad será analizada en la sección 2.6.3.



**Figura 2.1:** Envoltorio de Desvanecimiento en Diversidad en Recepción 1x2 (3).

## 2.4 Modelo de Señal MIMO

Utilizaremos el modelo mostrado en la figura 2.2, asumiendo que los canales son planos en frecuencia y todo el procesamiento estará referido a banda base.



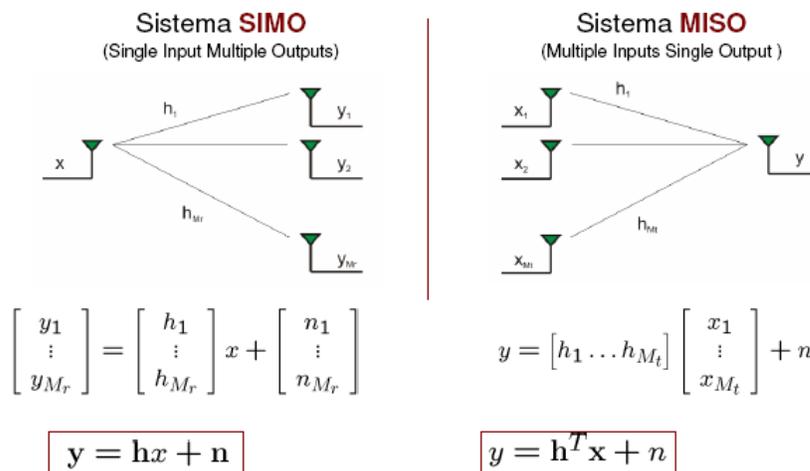
**Figura 2.2:** Representación de Sistema MIMO Matricial

En condiciones ideales de acuerdo al diagrama mostrado del sistema MIMO tendremos la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

En esta ecuación, particularmente en la matriz H podemos identificar los diferentes caminos de propagación creados por la cantidad de antenas tanto en el transmisor como en el receptor.

De los casos MIMO y SIMO planteados anteriormente en la sección 2.1 podemos realizar la misma representación, como se ve a continuación:



**Figura 2.3** Representación gráfica de Sistema SIMO y MISO.

### 2.4.1 Modelo del Canal MIMO

Al existir múltiples antenas transmisoras y considerando un medio que involucre objetos obstáculos que ocasionarán múltiples reflexiones, el modelo de propagación para un par de antenas en un sistema MIMO será un modelo de propagación multitrayectoria.

Tomando una señal  $x_t$  variable en el tiempo para ser transmitida por  $N$  antenas emisoras y ser recibida por  $M$  antenas receptoras se debe tomar en cuenta todos los posibles caminos entre las  $N$  antenas emisoras y las  $M$  antenas receptoras considerando que existe para cada trayectoria  $n,m$  ( $n = 0 \dots N, m = 0 \dots M$ ) un coeficiente de atenuación por propagación.

Entonces la señal que recibe la  $m$ -ésima antena receptora en el instante  $t$  producto de las  $n$  antenas emisoras será:

$$y_{t,m} = \sum_{n=1}^N h_{n,m} x_{t,m} + n_{t,m} \quad (2.2)$$

Es decir que esta antena recibe la superposición de todas las componentes de la señal transmitida de todas las antenas emisoras

atenuadas por su trayectoria de propagación adicionando una componente de ruido presente en la antena receptora.

Asumiremos que los coeficientes de atenuación para cada posible camino de propagación diferente son independientes e idénticamente distribuidos, así la ganancia de propagación de un camino puede modelarse como una variable aleatoria Gaussiana compleja haciendo de cada camino un canal Rayleigh, como se mencionó en la sección 1.1.2.

#### 2.4.2 Paralelización de Canales MIMO

Considerando la matriz  $H$  como modelo de canal mencionado en la sección anterior, el análisis del modelo mencionado anteriormente puede dar lugar a procesamiento muy complejo en el receptor, sin embargo recordemos que toda matriz se puede descomponer usando el método de descomposición en valores singulares con lo que tendríamos que:

$$H = U \Sigma V^H \quad (2.3)$$

Donde:

- $U$ : tendría dimensiones  $N_r \times N_r$

- $V$ : tendría dimensiones  $N_t \times N_t$
- $\Sigma$ : tendría dimensiones  $N_t \times N_r$  y será una matriz diagonal con los valores singulares de  $H$ .

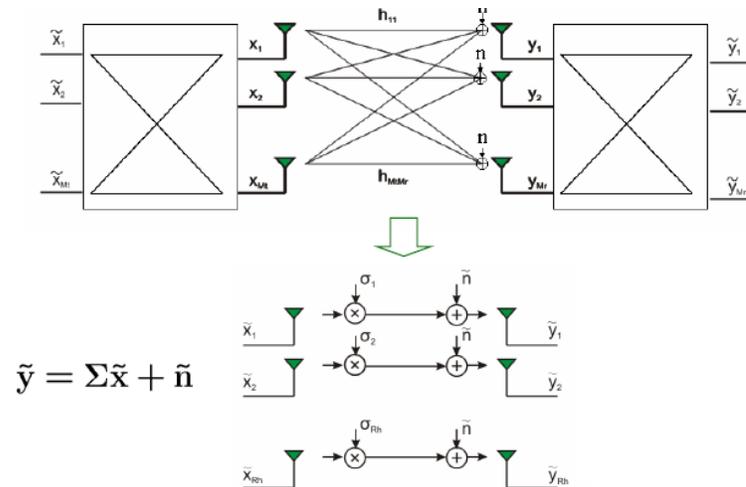
Considerando el caso que tengamos conocimiento total del canal en el transmisor (Channel State Information at Transmitter - CSIT) podríamos paralelizar el canal usando este método, con lo que lo convertiríamos en  $R_h$  canales paralelos, siendo  $R_h$  el número mínimo de valores singulares de  $\Sigma$  que no son cero.

Para paralelizar el canal seguiremos los pasos:

- En el transmisor pre-multiplicamos la señal por  $V$ :  $\mathbf{x} = V\tilde{\mathbf{x}}$
- En el receptor pre-multiplicamos la señal recibida por:  
 $\cdot U^H$ :  $\tilde{\mathbf{y}} = U^H \mathbf{y}$
- Entonces, en lugar de  $\mathbf{y} = H\mathbf{x} + \mathbf{n}$  tenemos:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}} &= U^H (H\mathbf{x} + \mathbf{n}) = U^H (U\Sigma V^H \mathbf{x} + \mathbf{n}) = U^H (U\Sigma V^H V\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n}) \\ &= U^H U \Sigma V^H V \tilde{\mathbf{x}} + U^H \mathbf{n} = \Sigma \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}} \end{aligned}$$

Como la matriz resultante  $\Sigma$  es diagonal entonces cada canal es independiente y no interfiere con ningún otro con lo que se ha paralelizado al canal concepto que se ve en la figura 2.4:



**Figura 2.4:** Representación de Paralelización de un canal MIMO con CSIT.

### 2.4.3 Multiplexación vs Diversidad

El aprovechar todas las antenas para poder transmitir la mayor cantidad de símbolos por segundo se denomina *ganancia de Multiplexación* y cada antena representará un canal independiente.

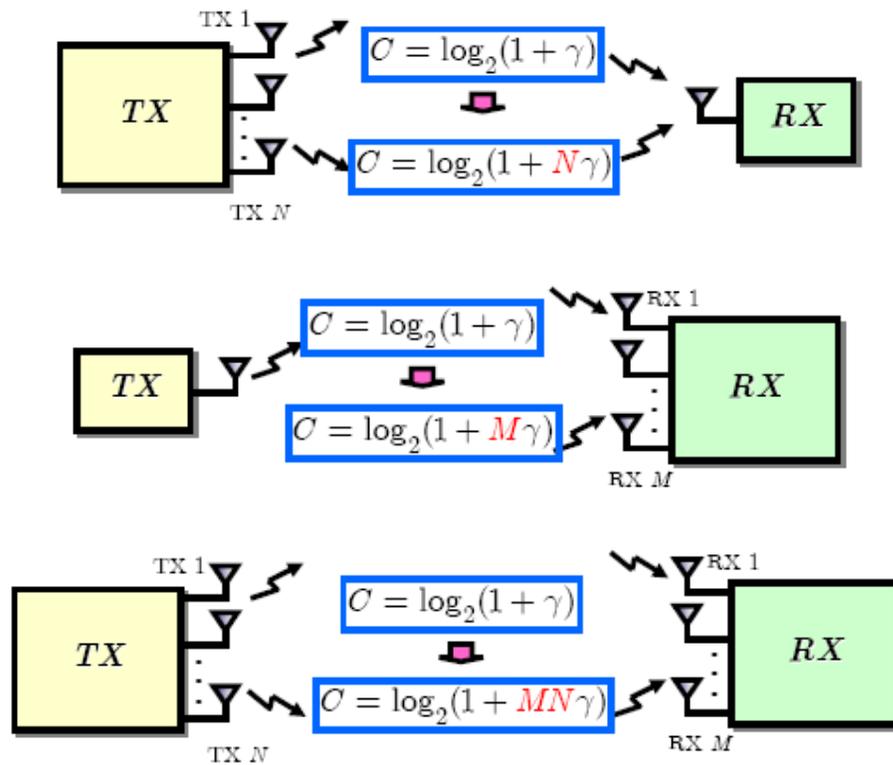
Por otro lado aprovechar todas las antenas para codificar un mismo símbolo y hacer el sistema más robusto frente al desvanecimiento se denomina *ganancia por diversidad*. Los sistemas MISO y SIMO vistos anteriormente ofrecen diversidad pero no ganancia de Multiplexación.

Ambos esquemas como tradicionalmente cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas funcionará al máximo teniendo información completa del canal en el transmisor (CSIT), sin embargo, tener CSIT puede llegar a ser muy complejo, en (6) se plantea que con el uso de Codificación Espacio-Temporal se puede:

- Obtener ganancia por diversidad: Códigos Ortogonales (STBC).
- Obtener ganancia por Multiplexación: Códigos BLAST

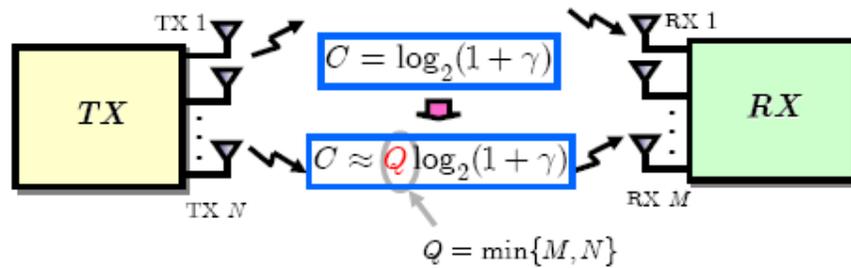
#### **2.4.4 Consideraciones de Capacidad del canal**

En (7) se demuestra que cuando existe diversidad espacial se produce un incremento lineal de la SNR, en la figura 2.5 se puede ver las relaciones de Capacidad del canal de acuerdo a la diversidad, la capacidad del canal se incrementará logarítmicamente en promedio y en caso de bajas SNR se incrementará linealmente a medida que se agreguen mas antenas, sin embargo en el caso de SNRs promedio y mientras se incremente la SNR el primer incremento de Capacidad será bastante significativo pero por la característica logarítmica de la función de Capacidad a medida que se incrementen las antenas la “ganancia de capacidad” será cada vez menos significativa.



**Figura 2.5:** Relaciones de Capacidad del Canal para Diversidad (17)

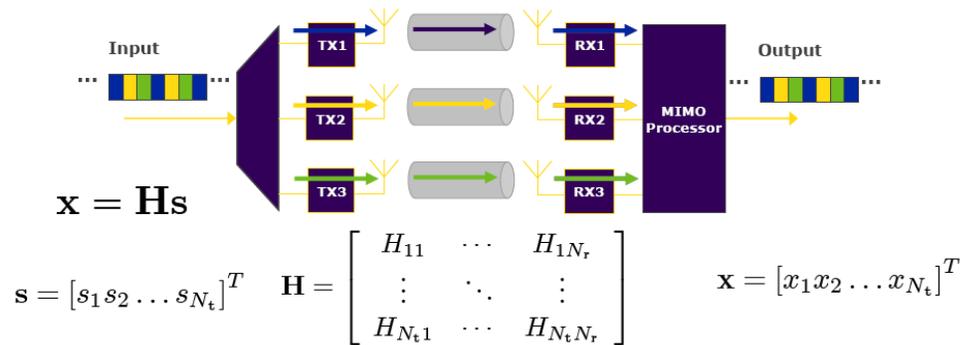
Por otro lado en (17; 18; 19; 20) se demuestra que con el uso de Multiplexación Espacial técnica que usa tramas independientes en el canal MIMO se puede lograr un incremento lineal, la relación se aprecia en la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Relación de Capacidad del canal para Multiplexación Espacial (17).

## 2.5 Multiplexación Espacial

La técnica de Multiplexación Espacial (SM – Spatial Multiplexing) se basa en utilizar al máximo la capacidad del arreglo de antenas en el Transmisor de tal manera que no se envíe la misma información en todas las antenas sino que los datos sean separados para su envío. La Multiplexación Espacial con el mismo ancho de banda permite transmitir y recibir más información dado que las diferentes antenas proporcionan canales de propagación distintos usados en paralelo por ende esta técnica se concentra en mejorar la tasa de transmisión del sistema en términos de la Eficiencia Espectral.



**Figura 2.7:** Esquema MIMO de Multiplexación Espacial (17)

De la Figura 2.7 tomaremos el modelo matemático general del sistema MIMO de Multiplexación Espacial que corresponde al mismo introducido en la sección 2.4:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.4)$$

Para esta técnica en el lado del receptor encontramos diferentes esquemas para el procesador MIMO (7):

- **Lineal**, incluye Zero Forcing y Error Cuadrático Medio Mínimo MMSE (Minimum Mean Square Error).
- **Iterativo**, incluye los esquemas BLAST referidos más adelante.
- **Búsqueda Completa**, Detector de Máxima Verosimilitud (MLD).

Como se introdujo en la sección 2.4.3 encontramos una variación especial para las técnicas espacio temporales que nos ayudará a

enfocar SM sin CSIT, esta variación es denominada BLAST (Bell Labs Layered Space/Time) desarrollada en los laboratorios Bell (3; 18), esta técnica introduce el concepto de “capa” que no es más que una subtrama de datos.

Entre las variantes de este esquema están:

- H-BLAST: En el esquema horizontal las señales se transmiten independientemente en diferentes moduladores a diferentes antenas.
- V-BLAST: cada antena transmite una cadena de símbolos independientes, para la detección de estos símbolos se pueden usar receptores lineales como ZF y MMSE, que tomarán la forma de un vector en cada una de las antenas receptoras de tamaño  $N_r$  para **anular** las contribuciones de las  $N_t-1$  cadenas de datos que interfieren.
- D-BLAST: En el caso del codificador Diagonal D-BLAST se agrupan los símbolos transmitidos en “capas” que son codificadas en el tiempo independientemente de las otras capas, luego, estas capas son asignadas a las distintas antenas transmisoras en una manera cíclica lo que resulta en que cada “capa” se transmite en “diagonal” en espacio y tiempo así se

logra obtener diversidad en el tiempo por codificación y en el espacio por la “rotación cíclica” de las capas en todas las antenas, en el receptor se usa un receptor iterativo que vaya anulando una a una las capas que ya fueron recibidas y detectando una a una la capa cancelando las aun no detectadas (3).

## **2.6 Diversidad Espacial**

Como vimos en la sección 2.3 la diversidad consiste en crear y usar diferentes canales para la transmisión/recepción de datos en el caso de diversidad espacial se crearán y usarán diferentes canales físicos o espaciales.

La diversidad Espacial se enfoca en incrementar la confiabilidad del enlace frente al desvanecimiento (1) y a la vez tiene la ventaja de que no se necesita ningún tipo de ancho de banda adicional para poder usar diversidad espacial, para medir esa mejora de confiabilidad en la capa física se usa la probabilidad de error de bit (BER).

El proveer mayor diversidad espacial en un sistema inalámbrico puede ser clasificado en dos esquemas diferentes para alcanzar dicho objetivo:

- **Beamforming**, en este esquema se trata de cambiar el los parámetros físicos de las antenas para poder enfocar o dirigir la energía de radiación en ciertas determinadas direcciones deseadas con la finalidad de eliminar la radiación de la antena en direcciones donde se puede ocasionar interferencia.

Beamforming plantea el uso de parámetros como la Dirección de Arribo (DOA) y el Angulo de Arribo (AOA) en base a ellos se decide las direcciones en donde se desea la máxima radiación de la antena y las direcciones donde se desea anular la radiación (4).

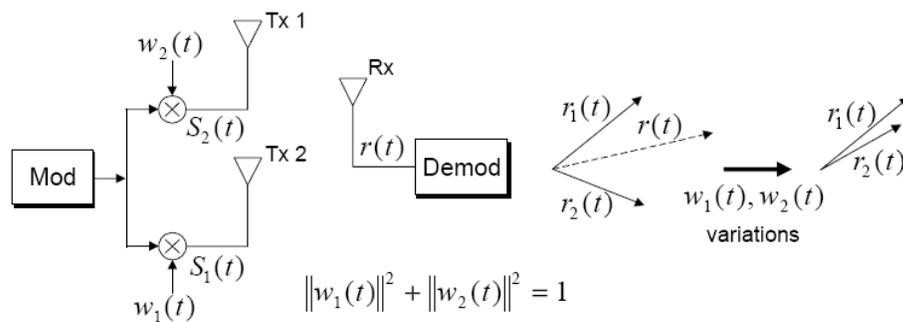
- **Diversidad en Transmisión/Recepción**, en cambio el esquema de Diversidad en Transmisión o Diversidad en Recepción se basa en el procesamiento necesario tanto en el transmisor y en el receptor para poder obtener diversidad espacial y hacer más robusto el sistema.

### 2.6.1 Diversidad en Transmisión

En diversidad en transmisión se agregan más de una antena en el transmisor y se envían señales de diferentes antenas transmisoras, esto

ocasionará interferencia entre ellas, por lo que será necesario procesamiento tanto en el transmisor como en el receptor. Podemos clasificar los esquemas para la Diversidad en Transmisión en los siguientes:

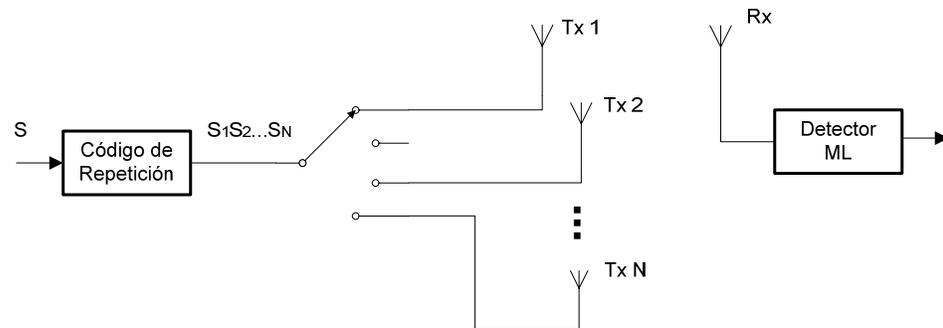
- **Diversidad en Transmisión con Realimentación**, en este esquema se usan coeficientes atenuadores en cada una de las antenas transmisoras con el fin de mejorar la potencia de la señal recibida, luego de la recepción se realimenta desde el receptor dicha información para modificar los coeficientes atenuadores y mejorar la potencia de la señal recibida.



**Figura 2.8:** Diversidad en Transmisión con Realimentación para CSI (8).

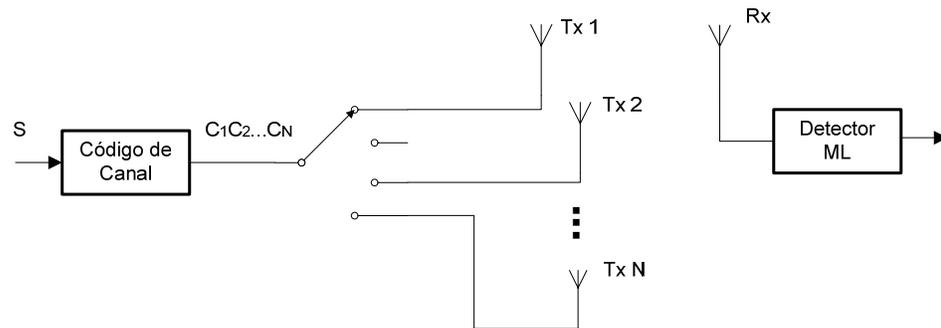
- **Diversidad en Transmisión por Salto de Antenas**, en este esquema una secuencia de datos S se retransmite en tiempos

diferentes por cada una de las antenas transmisoras usando un código de repetición, usando en el receptor un detector de máxima verosimilitud (ML) o MRC.



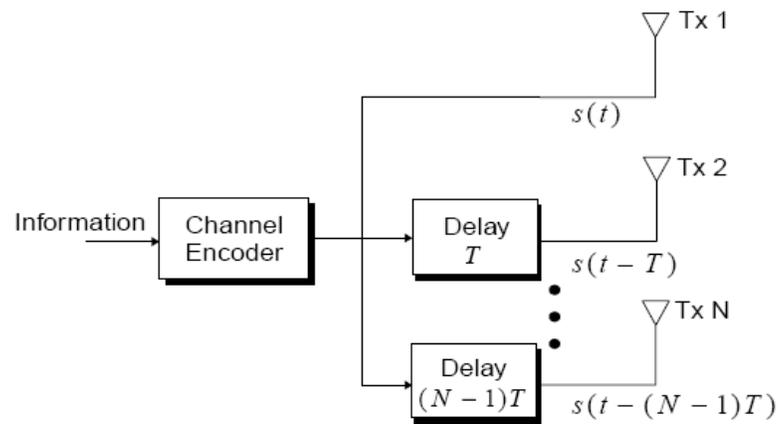
**Figura 2.9:** Diversidad en Transmisión con Salto de Antenas (8).

- **Diversidad en Transmisión con Codificación del Canal**, tomando como distancia Hamming del código del canal  $d_{min} \leq N$ , transmitimos el  $i$ -ésimo código a través de la  $i$ -ésima antena, luego de transmitir todos los códigos del canal en el receptor usamos un detector ML para decodificar la palabra de código recibida.



**Figura 2.10:** Diversidad en Transmisión con Codificación del canal (8).

- **Diversidad en Transmisión por Diversidad en Retardo,** Un sistema con diversidad por retardo es aquel que en el uso de múltiples antenas transmisoras solo una transmite la información a la vez haciendo que el resto de antenas no sean utilizadas hasta que pase cierto retardo programado, así provee un beneficio de diversidad introduciendo un Multi-camino intencional y el receptor usará un ecualizador o un detector de máxima verosimilitud con estimación de secuencia.



**Figura 2.11:** Diversidad en Transmisión con Retardo de Transmisión (8).

- **Diversidad en Transmisión con STC**, como otra opción para proveer Diversidad en Transmisión consideraremos en la siguiente sección las técnicas de Codificación Espacio Temporal (Space Time Coding – STC). Si existe información del estado del canal (CSI) en el Transmisor entonces podemos usar técnicas de Beamforming, de lo contrario lo recomendable es usar Técnicas de Codificación Espacio Temporal.

### 2.6.2 Codificación Espacio-Temporal y Codificación de Alamouti

La Codificación Espacio-Temporal es una técnica basada en introducir al sistema de comunicaciones un Codificador/Procesador de señal preparado para el uso de múltiples antenas en el transmisor como en el

receptor explotando las ventajas que ofrece MIMO, con ambos esquemas Multiplexación como se revisó en la sección 2.5 o diversidad, este codificador no solo funcionará a través del espacio (distintas antenas) sino también a través del tiempo (6). En el caso particular de tener 2 antenas en el transmisor se puede usar el Código Alamouti.

Alamouti propuso un esquema de Codificación Espacio Temporal en Bloque (STBC) dentro de la técnica de Diversidad en Transmisión usando dos antenas en el transmisor y una antena en el receptor (8), ver la Figura 2.12. La división de transmisión de los símbolos esta explicado en el siguiente cuadro:

Instante de Tiempo	Antena 1	Antena 2
$t = 0$	$s_0$	$s_1$
$t = T$	$-s_1^*$	$s_0^*$

**Tabla I:** Esquema de Alamouti en Tiempo y Espacio

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.

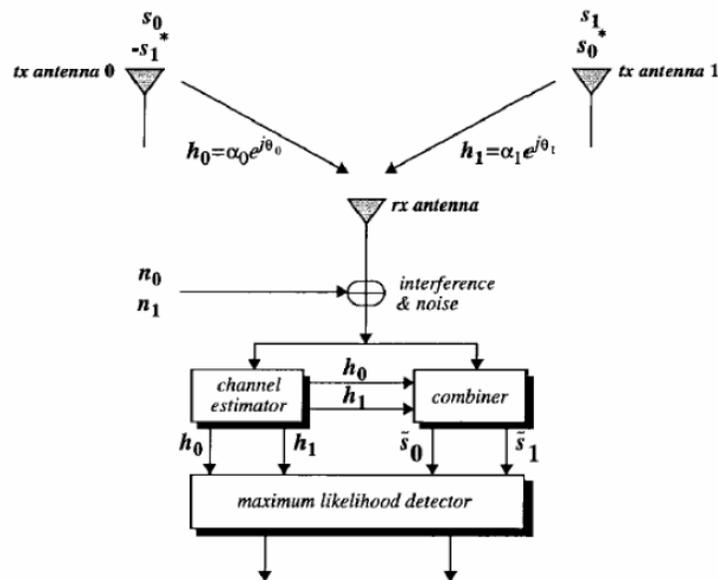


Figura 2.12: Esquema de Alamouti (8)

Este esquema maximiza de una manera sencilla el uso de Diversidades en el sistema de transmisión puesto que se toman en cuenta 2 instantes de tiempo (Diversidad Temporal) y 2 antenas de transmisión (Diversidad Espacial).

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

$$S = \begin{bmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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:

$$H = [h_0 \quad h_1] \quad (2.8)$$

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

$$h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \quad (2.9)$$

$$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \quad (2.10)$$

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

Instante de Tiempo	Operación $y = Hx + n$	Resultado
$t = 0$	$r_0 = [h_0 \quad h_1] \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + n_0$	$r_0 = s_0 h_0 + s_1 h_1 + n_0$
$t = T$	$r_1 = [h_0 \quad h_1] \begin{bmatrix} -s_1^* \\ s_0^* \end{bmatrix} + n_1$	$r_1 = -s_1^* h_0 + s_0^* h_1 + n_1$

**Tabla II:** Recepción en dos instantes de Tiempo

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:

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s(1) \\ s(2) \end{pmatrix} + \mathbf{n} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) está planteada de la forma general del modelo de señal MIMO de la sección 2.3 en donde podemos identificar la matriz  $\mathbf{H}$  para este caso:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

A partir de (2.12) podemos encontrar la matriz:

$$\mathbf{H}^H = \begin{bmatrix} h_0^* & h_1 \\ h_1^* & -h_0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Que es la matriz transpuesta y conjugada de  $\mathbf{H}$  y que cumplirá:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 h_0^* + h_1 h_1^* & 0 \\ 0 & h_1 h_1^* + h_0 h_0^* \end{bmatrix} = \mathbf{cI} \quad (2.14)$$

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

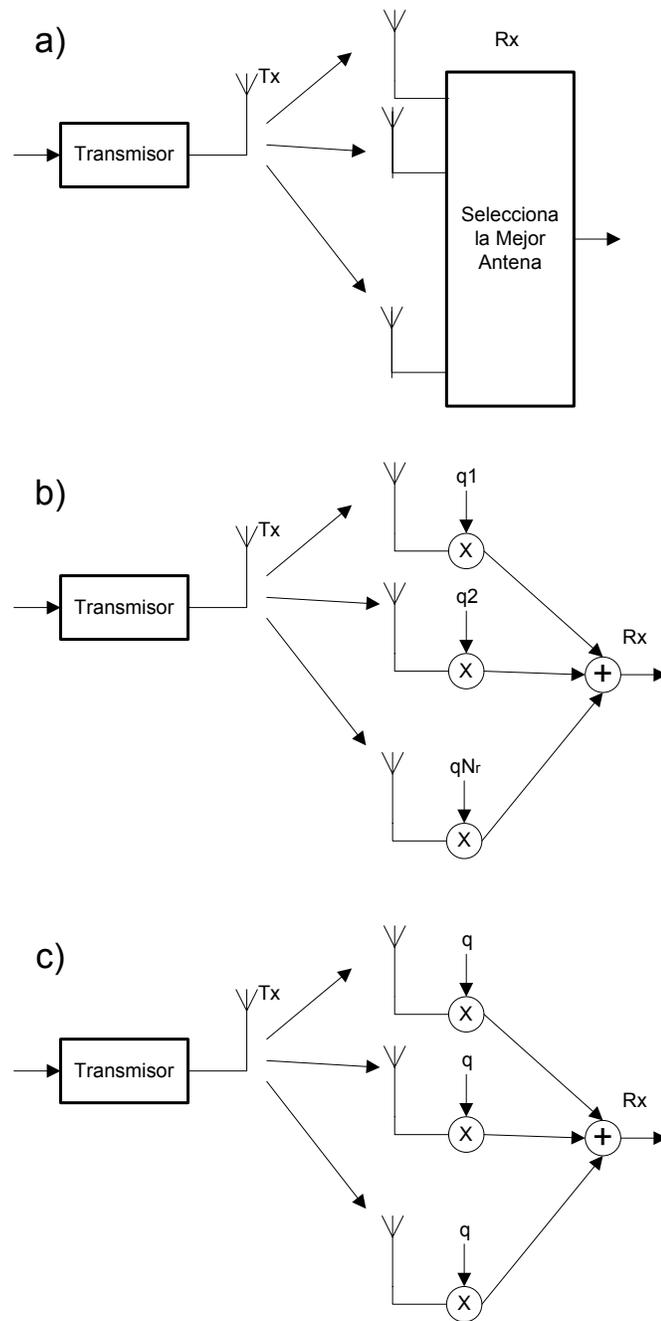
$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 h_0^* + h_1 y_1^* \\ y_0 h_1^* - h_0 y_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_0 h_0^* + h_1 h_1^*) s_0 \\ (h_1 h_1^* + h_0 h_0^*) s_1 \end{bmatrix} + \mathbf{H}^H \mathbf{n} \quad (2.15)$$

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  $s$ .

### **2.6.3 Diversidad en Recepción**

La diversidad en Recepción consiste en el uso de múltiples antenas en el receptor para generar recepciones independientes de la señal transmitida, esto se logra con una separación adecuada de las antenas receptoras (3).

Tendremos múltiples señales recibidas por el uso de múltiples antenas receptoras por lo tanto debemos tener un método para poder seleccionar o procesar las  $N_r$  señales recibidas, en este modelo consideraremos 3 métodos diferentes para el procesamiento de las señales recibidas, los cuales están representados en la Figura 2.13 y se describen a continuación:



**Figura 2.13:** Diversidad en Recepción: a) SC, b) MRC, c) EGC

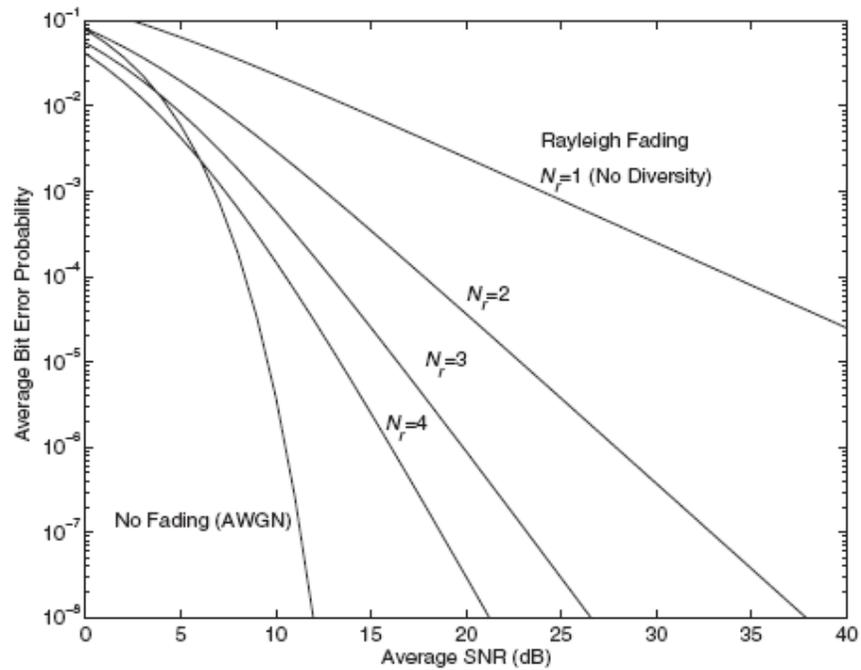
- **Combinación por Selección (SC)**

Se basa en escoger de entre las  $N_r$  señales recibidas a la que tenga mejores características en el momento de la evaluación por lo general el criterio para dicha evaluación es cierto umbral de SNR definido.

Como solo una antena es procesada al mismo tiempo este esquema necesitaría solo de un receptor que será usado de acuerdo a la antena que sea procesada en un determinado instante, para el caso específico de sistemas que transmitan continuamente, la SC evita la necesidad de un receptor dedicado en cada "ramal" escaneando todos los "ramales" en un orden secuencial y seleccionando para la salida del selector a la primera señal con la SNR que supere a un umbral dado. Este esquema desaprovecha la posible información útil de las señales que no seleccionó.

En la Figura 2.14 podemos apreciar el desempeño del sistema usando SC, como se puede ver el cambio de usar un sistema SISO a un sistema MIMO 1x2 es bastante considerable teniendo una disminución de alrededor de 12dB de SNR requerida para obtener 1% de BER comparándolo con un sistema 1x1, sin

embargo el incremento de mas “ramales” de antenas en el receptor a partir del sistema 1x2 no proporciona un gran incremento del rendimiento del sistema.



**Figura 2.14:** BER vs. SNR Diversidad en Recepción (2).

- **Combinación de Tasa Máxima (MRC)**

En el esquema anterior la salida del combinador es igual a una de las señales por la cual se decidió, en MRC (Maximal Ratio Combining) la salida será la suma ponderada de todos los “ramales”.

La distribución de la SNR a la salida del combinador no es Rayleigh a pesar que todos los “ramales” sufren desvanecimiento Rayleigh.

La suma ponderada que hemos mencionado corresponde, como se ve en la figura 2.11, que cada componente de señal receptada en cada una de las antenas o “ramales” será multiplicada por un factor que atenuara esa componente de ramal en (1) se demuestra que para maximizar la SNR de la señal total recibida se debe escoger como factor de ponderación la misma SNR del ramal es decir que cada ramal será atenuado por el mismo SNR del ramal haciendo que los canales más débiles (baja SNR) contribuyan con menor componente de señal que los ramales “fuertes” (alta SNR).

- **Combinación de Igual Ganancia (EGC)**

Esta técnica usa el mismo factor de atenuación para todos los “ramales” evitando la necesidad de conocer la SNR en cada “ramal” como el caso de MRC.

# Capítulo 3

## **ANALISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA MIMO OFDM**

Luego del análisis realizado al esquema OFDM en el capítulo 1 y a las diversas técnicas MIMO de las cuales se ha elegido al esquema de diversidad espacial en el transmisor con codificación espacio temporal de Alamouti, se ha desarrollado el modelo de un sistema MIMO-OFDM en MATLAB, el modelo es descrito por el algoritmo detallado en este capítulo.

### **3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA**

El enfoque de simulación del sistema será el procesamiento de las señales y el modelamiento del mismo por lo que no se considerará el análisis de RF sino solo en banda base así mismo tampoco se considerarán los efectos físicos de las antenas ni del medio.

Las características presentadas en este capítulo corresponden al desarrollo del simulador, los detalles técnicos de los modelos fueron ya presentados en los capítulos anteriores.

### 3.1.1 Especificaciones de la señal a Transmitir

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.

PARAMETRO	VALOR	
Formato de Imagen	JPG	
Gama de Colores	Blanco y Negro (1 y 0)	
Tamaño	< 500x500	Sin cambios
	> 500x500	Redimensionamiento por un factor de 3

**Tabla III:** Especificaciones de la señal entrada.

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.

### **3.1.2 Especificaciones del Transmisor**

La técnica MIMO utilizada será el codificador de Alamouti planteado en la sección 2.6.2, que proveerá al sistema de diversidad en transmisión, usando el código espacio temporal ortogonal de Alamouti, por lo que usaremos dos antenas (entradas del sistema) en el transmisor y 1 (salida del sistema) antena en el receptor, el sistema permitirá también realizar la comparación con un sistema SISO para evaluar el efecto del STC en el sistema.

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Técnica MIMO</b>	Diversidad en Transmisión
<b>Numero de Antenas Transmisoras</b>	2
<b>Numero de Antenas Receptores</b>	1
<b>Técnica de Diversidad</b>	Codificación Espacio Temporal: Alamouti

**Tabla IV:** Especificaciones del Transmisor MIMO

En la simulación se evaluará la técnica MIMO sobre un esquema de modulación OFDM, las características de la generación y ensamblado OFDM seguirán las especificaciones planteadas en la sección 1.2.2.1.

El enfoque del simulador no es evaluar el rendimiento del sistema OFDM ni la variación de sus especificaciones por lo que estas quedarán fijas en el sistema de acuerdo a la tabla V.

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Número de Puntos de la FFT:</b>	64
<b>Numero de Sub-portadoras de datos:</b>	52
<b>Número de Bits por Símbolo:</b>	52
<b>Prefijo Cíclico</b>	1/4, 16 símbolos
<b>Número total de Subportadoras</b>	64
<b>Guarda + Símbolo</b>	80
<b>Zero Padding</b>	Primeros 6 y Últimos 5 Símbolos

**Tabla V:** Especificaciones OFDM

### 3.1.3 Especificaciones del Canal

El canal a utilizar tendrá desvanecimiento multitrayectoria con distribución Rayleigh, el simulador permitirá evaluar ambos tipos de desvanecimiento multitrayectoria, plano y selectivo en frecuencia. Para el caso de un canal multitrayectoria selectivo en frecuencia también se podrá evaluar el sistema variando el número de de “taps” mediante un control en el simulador.

En el receptor se degradará el canal con ruido AWGN y se permitirá variar la SNR para realizar diferentes evaluaciones del sistema, se podrá también eliminar el efecto multitrayectoria para evaluar el sistema solo bajo AWGN, especificaciones resumidas en Tabla VI.

PARAMETRO	VALOR
<b>Modelo del canal:</b>	Desvanecimiento multitrayectoria
<b>Distribución del Modelo</b>	Rayleigh
<b>Tipo de Desvanecimiento</b>	Plano y Selectivo en Frecuencia
<b>Ruido en Receptor</b>	AWGN

**Tabla VI:** Especificaciones del Canal

### 3.1.4 Especificaciones Receptor

Por el lado de la detección OFDM como se demuestra en (2) se realiza una ecualización en el dominio de la frecuencia, como se tiene total CSI en el receptor se toman las componentes del canal en el dominio de la frecuencia para realizar la ecualización de los símbolos que ya fueron transformados como se discutió en la sección 1.2.1.2.

En combinación con la ecualización simple de OFDM se usará el esquema descrito en la sección 2.6.2 que corresponde a la técnica para decisión y decodificación en el esquema Alamouti, resumiendo en la tabla VII.

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Esquema de Detección</b>	Detección de Alamouti con mínima distancia Euclidiana
<b>Ecualización</b>	OFDM en Dominio de la Frecuencia (Zero Forcing)

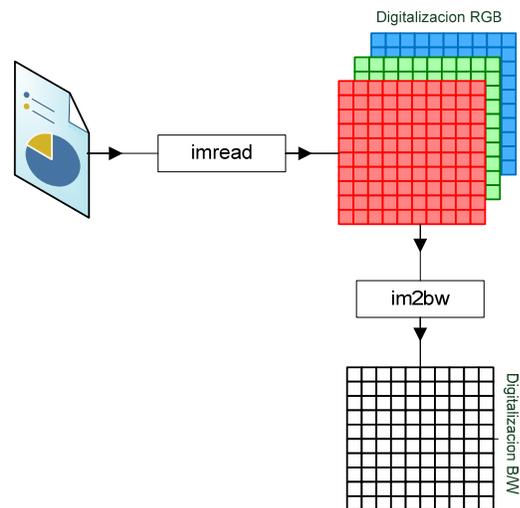
**Tabla VII:** Especificaciones del Receptor

## **3.2 ANALISIS DE PROCESOS DEL SISTEMA**

### **3.2.1 Proceso de Digitalización de la Señal a Transmitir**

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 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).



**Figura 3.1:** Proceso de Digitalización de la Imagen a partir de Archivo.

La imagen digitalizada en MATLAB será una variable de tres dimensiones, dicha variable se puede interpretar como representa la salida del bloque “imread” en la Figura 3.1, es decir como 3 matrices.

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.

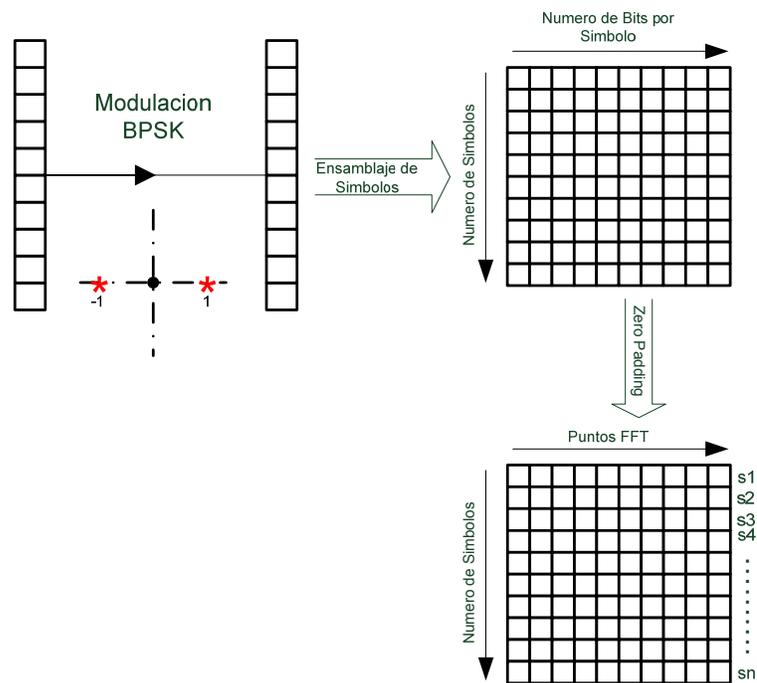
Con el objetivo de hacer menores los tiempos de simulación se ha diseñado el sistema para tratar imágenes en blanco y negro por lo que luego de la digitalización de la imagen con "imread" dicha señal resultante se convertirá en una señal imagen en blanco y negro como termina de describir la Figura 3.1

Se tendrá como señal resultante una sola matriz binaria que representa la imagen en blanco y negro, esta señal-variable ya en formato binario esta lista para ser procesada por el sistema.

### **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 BPSK.



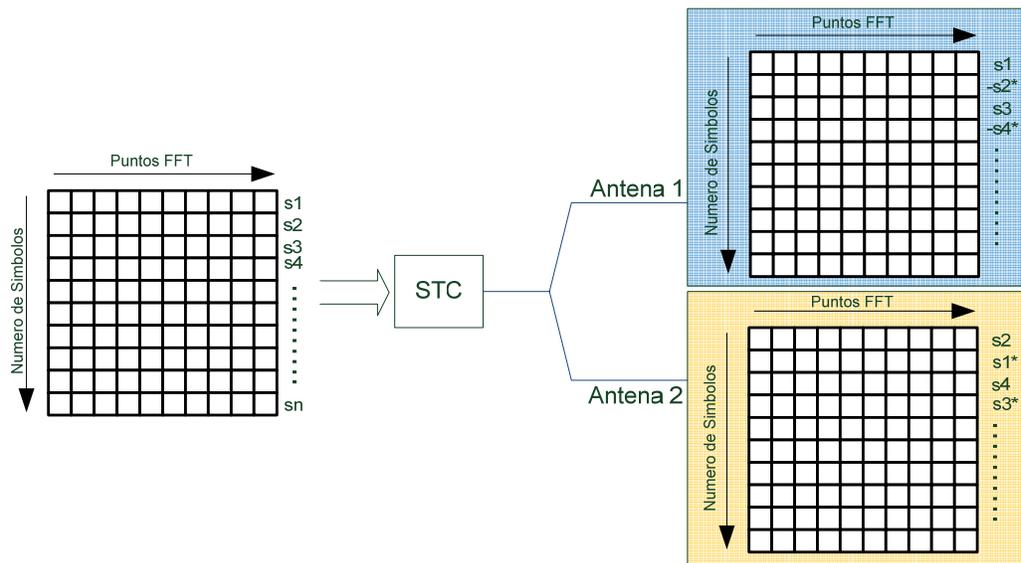
**Figura 3.2:** Modulaci3n de la se1al y Ensamblado de s3mbolos

Con los s3mbolos modulados la se1al pasa al ensamblado de los s3mbolos de acuerdo a las especificaciones del sistema, en la Figura 3.2 se muestra el proceso de modulaci3n mencionado anteriormente y adicionalmente se representa la formaci3n de los s3mbolos.

Cada fila de la nueva matriz formada representa un s3mbolo OFDM que se est1 formando, como indican las especificaciones con 52 bits por s3mbolo. Estos s3mbolos ser1n transmitidos secuencialmente en donde

cada fila representa no solo el símbolo sino también la duración del mismo.

Como parte de la modulación OFDM se realiza la agregación de ceros de acuerdo a las especificaciones formando los símbolos finales a ser procesados por la IFFT de 64 puntos contando con 64 subportadoras, cabe recalcar que además de representar cada uno de los símbolos OFDM que se están formando cada una de las filas representa una componente en frecuencia pues cada símbolo de  $nFFT$  bits, donde  $nFFT$  es el número de puntos de la FFT, será modulado por una subportadora de las mencionadas en las especificaciones.



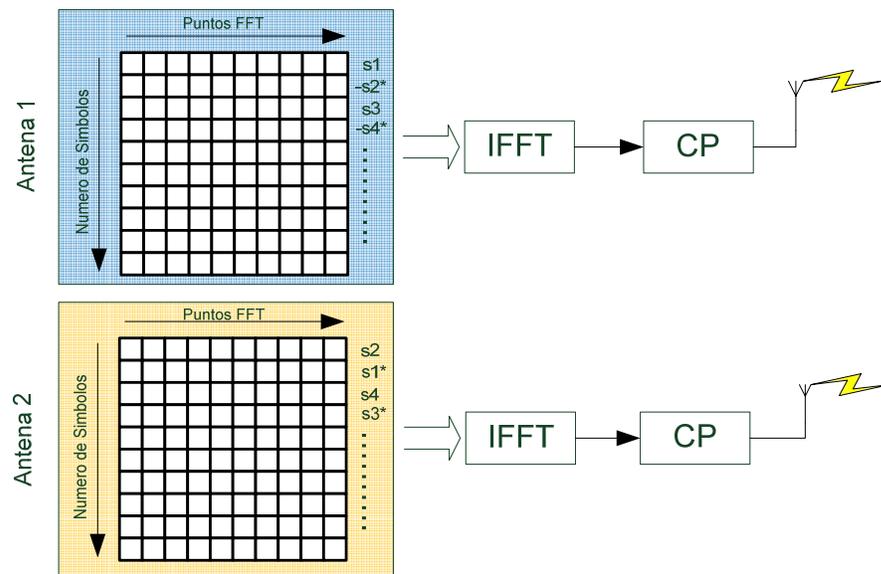
**Figura 3.3:** Proceso de Codificación de Alamouti sobre símbolos OFDM.

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.

En la figura 3.3 también se identifica como cada símbolo, representado por las filas, muestra que han sido procesados por el codificador de Alamouti de acuerdo a la regla de codificación descrita en la sección 2.6.2, así mismo recordando que cada fila representa un instante de transmisión o duración de símbolo, se aprecia en la figura mencionada que se cumple con el esquema de transmisión de Alamouti donde cada símbolo con su correspondiente codificación es transmitido durante dos instantes de tiempo.

Teniendo formados y codificados los conjuntos de símbolos para la transmisión en cada una de las antenas se prosigue con la modulación OFDM de cada uno de estos, mostrado en la Figura 3.4

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.



**Figura 3.4:** Modulación de los símbolos de Alamouti

Como se explicó en la sección 1.2.1.1 la modulación realizada por la IFFT también cambia el sentido de que cada fila representa una componente en el dominio de la frecuencia y vuelve a la salida del bloque IFFT a cada una de las filas una señal en el dominio del tiempo.

El siguiente paso es agregar el prefijo cíclico que se describió en la sección 1.2.1.4 y de acuerdo a las especificaciones tendrá una longitud determinada y completará la duración del símbolo en el dominio del tiempo al aumentar de tamaño al símbolo OFDM ya formado.

### **3.2.3 Descripción del canal en el sistema**

El canal se modela de acuerdo a la cantidad de símbolos, esta condición permitirá mantener independiente el desvanecimiento multitrayectoria que afecta a cada símbolo y también se deberá considerar independiente el desvanecimiento multitrayectoria 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 número de taps.

El desvanecimiento multitrayectoria 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.

La matriz del canal tal como se ha definido corresponde al canal en el dominio del tiempo con tantas filas como símbolos, cada una diferente, haciendo que el canal sea diferente en cada instante de tiempo o duración de símbolo, sin embargo de acuerdo a las especificaciones una asunción válida para los sistemas MIMO de codificación espacio-temporal es que el canal se mantenga constante durante dos tiempos de símbolo lo necesario para que en dos antenas se pueda transmitir el tercer símbolo luego de la repetición de los dos primeros símbolos por la codificación de Alamouti.

En el algoritmo de solución del sistema el proceso de transmisión de la señal OFDM por el canal inalámbrico se llevará a cabo con la convolución de cada uno de los símbolos OFDM con las componentes del canal en el dominio del tiempo.

### 3.2.4 Recepción de la señal MIMO OFDM

Luego de que cada uno de los símbolos de cada una de las antenas transmisoras ha sido transmitido por el canal inalámbrico con desvanecimiento multitrayectoria, a la entrada del receptor se encontrará la suma de todas las señales del medio inalámbrico.

Así mismo a la entrada del receptor tendremos 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.

Para el análisis en el receptor y la recuperación de la señal se realiza el proceso inverso que se da para conformar la señal OFDM, es decir se remueve el prefijo cíclico y se lleva la señal al dominio de la frecuencia mediante la FFT.

En el receptor además se toman en cuenta las consideraciones del canal ya descritas en las especificaciones y en la sección 2.6.2, por lo que según la regla de decisión de la sección 2.6.2 se transforma la

matriz del canal para formar la nueva matriz de la ecuación (2.13), esta operación es de acuerdo a lo planteado para la detección del esquema 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.

Recuperados los datos binarios originales se debe de retomar al formato original de imágenes, lo que conlleva a transformar los símbolos ensamblados para ser símbolos OFDM en un vector largo nuevamente para luego recuperar la forma de matriz binaria del tamaño de la imagen.

# Capítulo 4

## ANALISIS DE RESULTADOS

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.

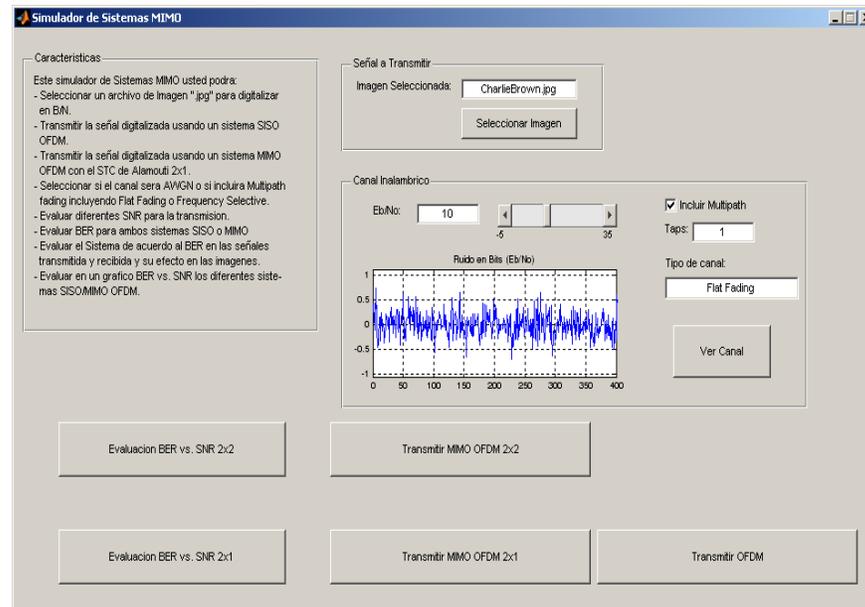
#### 4.1 Descripción de la Interfaz

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 2.6.2.

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 multitrayectoria en el canal, en caso de que el efecto multitrayectoria 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.

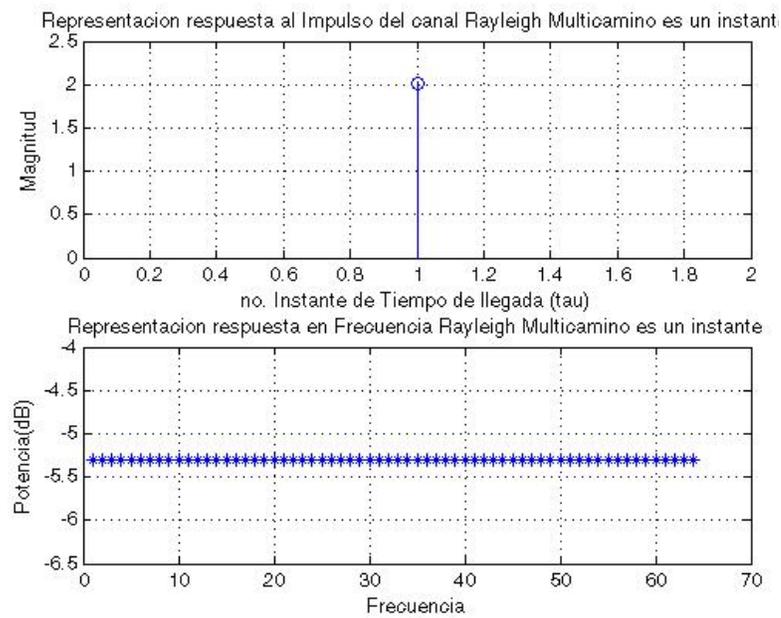


**Figura 4.1:** Interfaz Gráfica del Simulador

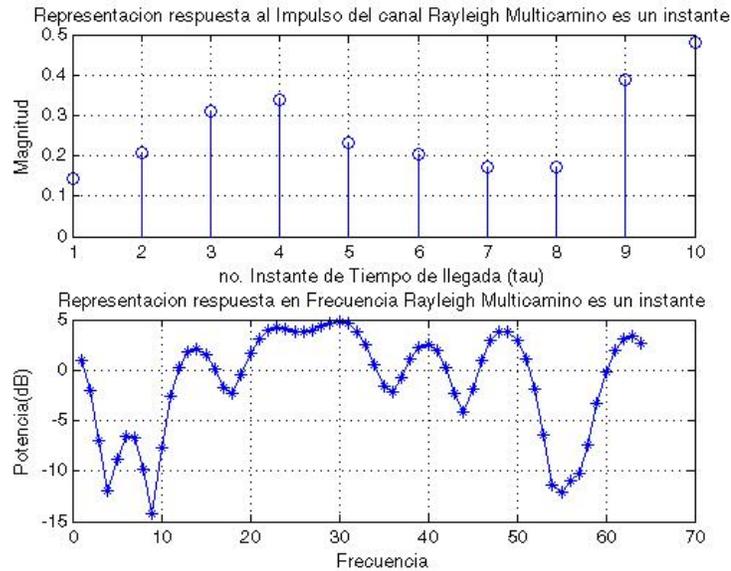
Existe también un botón que permite ver una representación gráfica del canal, en la Figura 4.2 (a) se muestra la representación del canal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia para dicho caso se aprecia que el canal tiene solo un tap en el dominio del tiempo por lo que el canal en 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.

Las gráficas que muestra dicho control son diferentes para cada vez que el usuario presione el botón y cada grafica estará representando el desvanecimiento independiente que sufren los símbolos que se están transmitiendo.



(a) Flat Fading



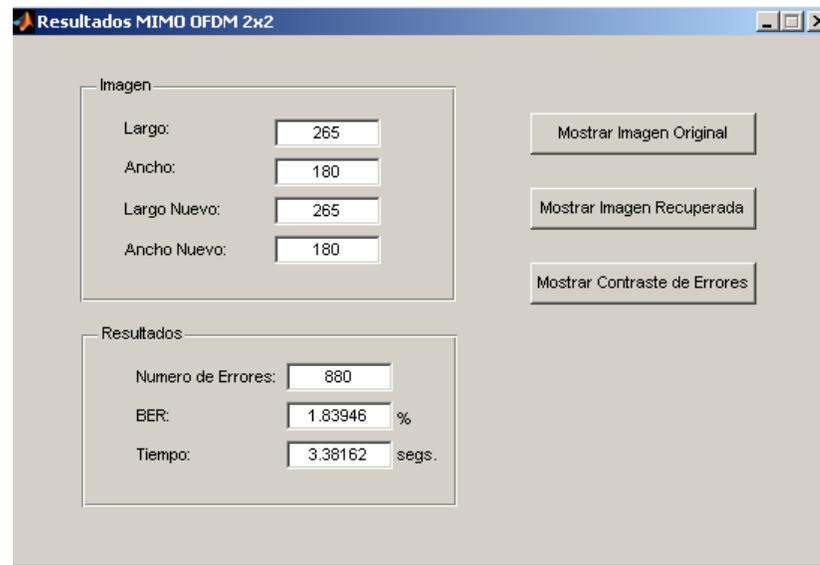
(b) Frequency Selective fading.

**Figura 4.2:** Representación GUI de canales.

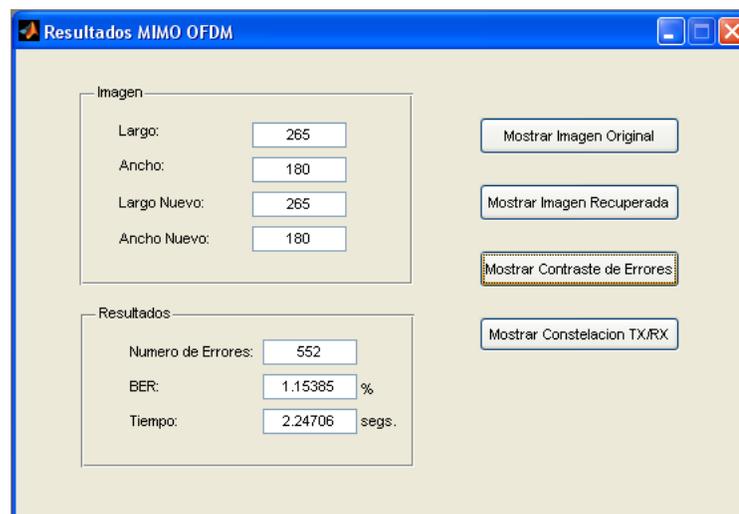
Al momento de usar los controles de transmisión mostrados en (d), empieza la simulación y luego de terminar el procesamiento en transmisor y en receptor se activa un panel adicional para mostrar los resultados, en la Figura 4.3 esta la captura de pantalla de dicho panel.

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) Detalle de Resultados de MIMO OFDM



(b) Detalle de Resultados de OFDM

**Figura 4.3:** Panel de Resultados,

La Figura 4.3 (a), muestra en detalle el panel de resultados donde se puede verificar la cantidad de errores, la BER en porcentaje y el tiempo transcurrido de simulación desde el momento en que se activo el control de simulación en el panel principal hasta la aparición de resultados en el panel actual, todos estos resultados en (a) son para el control de simulación MIMO OFDM Alamouti, en la figura (b) se muestra la misma información para el caso del sistema OFDM SISO, en dichos resultados se puede identificar el efecto del uso del sistema MIMO con 2 antenas en comparación con el sistema SISO en donde se comprueba la mejora de la fiabilidad del sistema en términos de cantidad de errores, el uso del sistema MIMO bajo las mismas condiciones del canal permite una reducción de hasta la tercera parte de la cantidad de errores original con OFDM SISO en este ejemplo.

#### **4.2 Evaluación del Sistema basado en Imágenes transmitidas y recibidas.**

Dentro del panel descrito anteriormente también se puede evaluar los resultados de acuerdo a la imagen que fue transmitida, pues existen tres controles que permitirán evaluar el sistema de acuerdo a las imágenes, en la Figura 4.3 (d) se muestran los controles.

### Collection of MATLAB books



(a) Imagen JPG color original

### Collection of MATLAB books



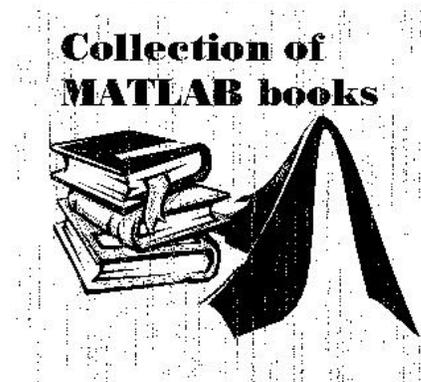
(b) Imagen Digitalizada B/W.

**Figura 4.4:** Proceso de digitalización de la Imagen comparativa.

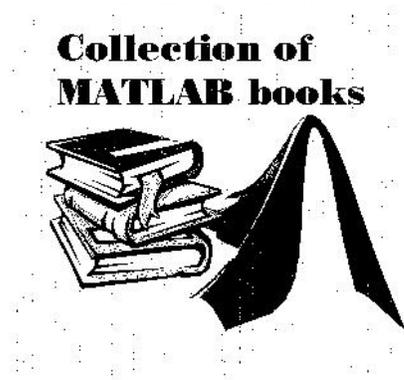
El primer botón permitirá ver la imagen original que fue digitalizada y que es la señal de entrada del sistema, como ejemplo en la Figura 4.4 (a) se muestra una imagen sin digitalizar en formato JPG a color, en (b) se muestra la imagen digitalizada por MATLAB que corresponde al resultado del primer botón descrito anteriormente, como se explico en la Sección 3.2.1 ya en formato de matriz binaria, blanco y negro.

El segundo botón de la Figura 4.3 (d) permite ver la imagen recuperada luego de la detección en el receptor, de acuerdo a las condiciones de simulación esta imagen permitirá evaluar la calidad del sistema de acuerdo a las condiciones del canal, dado que gráficamente podremos identificar los errores.

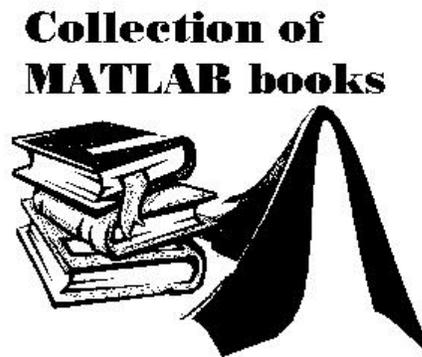
En la Figura 4.5 (a) se muestra la imagen recuperada con OFDM y en (b) la imagen recuperada con MIMO OFDM 2x1 y (c) la imagen recuperada con MIMO OFDM 2x2, resultados del control descrito en la sección anterior, donde gráficamente se puede evaluar la mejora significativa de usar MIMO versus no usarlo y los errores descritos en la sección 4.1 son más perceptibles por mostrarse gráficamente en la señal de interés.



(a) Imagen recuperada con OFDM,



(b) Imagen recuperada con MIMO OFDM Alamouti 2x1

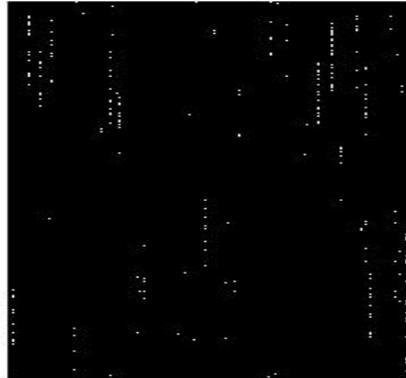


(c) Imagen recuperada con MIMO OFDM Alamouti – MRC 2X2

**Figura 4.5:** Comparativa de Imágenes luego de Simulación

El tercer botón que se mostró en la Figura 4.3 (c) permite mostrar una imagen de contraste que corresponde a la resta algebraica entre la señal recibida y la señal transmitida, como ejemplo en la figura 4.6 se muestra un contraste ejemplo para un número reducido de errores así los usuarios visualizando todas las imágenes resultado en conjunto

podrán identificar y corroborar los resultados mostrados en valores numéricos.



**Figura 4.6:** Contraste para identificar gráficamente errores

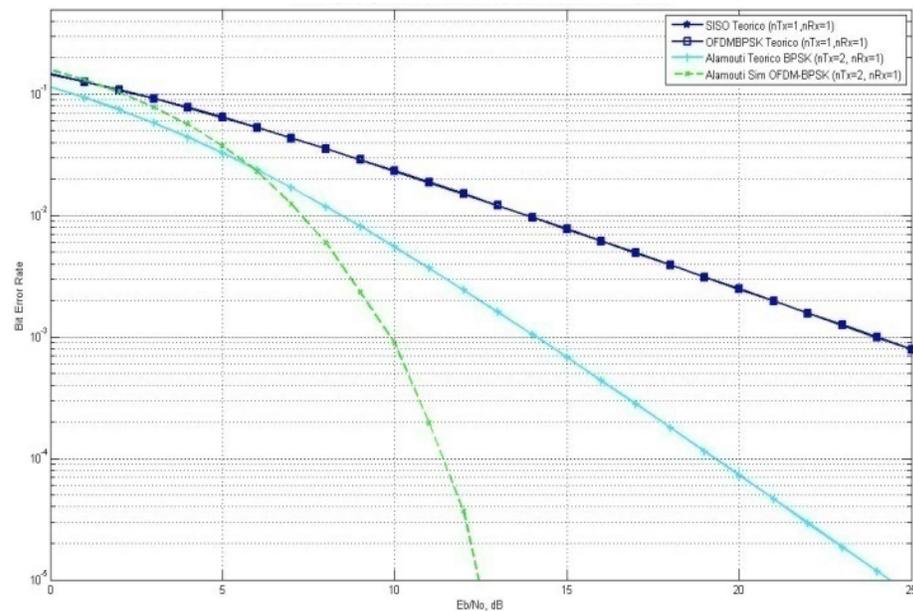
### 4.3 Evaluación BER vs. SNR variando el Canal

Un enfoque muy importante es la evaluación de resultados en una grafica BER vs. SNR por lo que en el panel principal se ha incluido un botón que controla la simulación del sistema MIMO OFDM a diferentes SNR para poder construir el mencionado grafico.

Cada vez que se ejecuta este control se genera el grafico correspondiente a la curva de BER, si se desea evaluar a diferentes condiciones del sistema, específicamente del canal, se puede realizar dado que se encuentra activado el control “hold on” de gráficos en

MATLAB lo que permitirá sobreponer las graficas y obtener resultados como los de la Figura 4.7.

En la Figura 4.7 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.

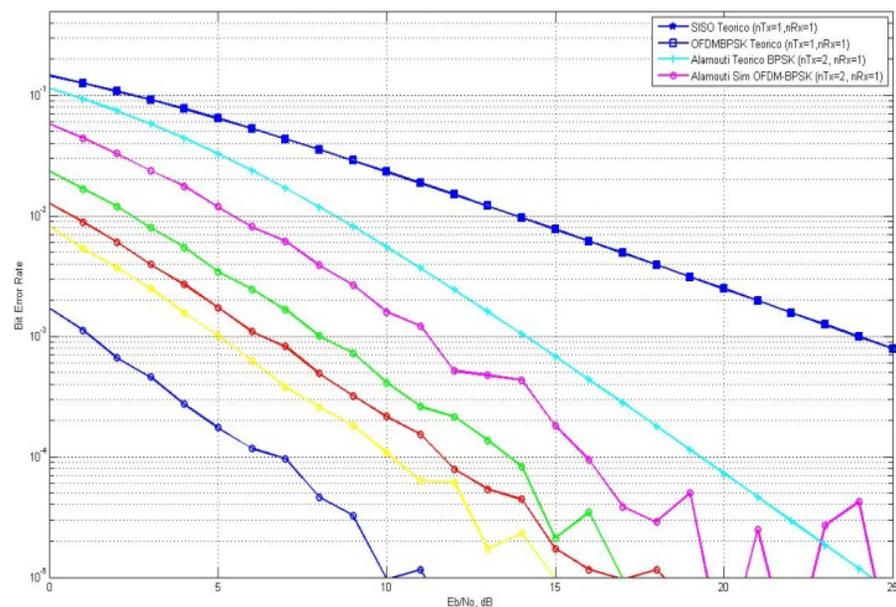


**Figura 4.7:** BER vs. SNR Alamouti-OFDM, SISO OFDM

En la gráfica descrita anteriormente se puede identificar la ganancia en términos de las curvas OFDM SISO y la de OFDM MIMO existe hasta una diferencia significativa, por ejemplo para tener una detección en un canal multitrayectoria con desvanecimiento plano de hasta  $10^{-3}$  de tasa de errores se necesitan alrededor de 24 dB si usamos un sistema SISO sin embargo el aumentar a 2 antenas transmisoras nos representa una mejora de hasta 12 dB pues como se aprecia en la gráfica se necesitan alrededor de 13dB para obtener el mismo rendimiento, por lo que en esta gráfica se muestra como la diversidad de transmisión otorgada por el código espacio temporal de Alamouti representa grandes prestaciones en la fiabilidad del sistema a pesar de introducir una pérdida por la redundancia en la transmisión de símbolos.

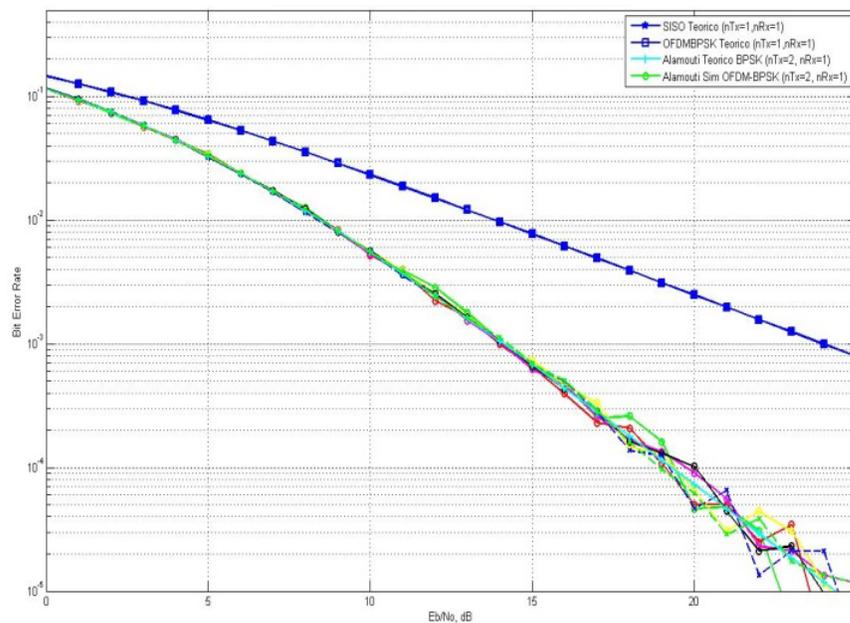
Por otro lado el aumentar el número de antenas hace que para evaluar este sistema con un sistema tradicional SISO sea necesario realizar ajustes que permitan comparar ambos sistemas bajo las mismas condiciones, el aumentar antenas en el transmisor conllevaría a tener un incremento de la potencia de transmisión así mismo con variaciones en la cantidad de taps del canal es necesario cuidar que la potencia manejada por cada elemento del sistema permanezca siempre igual para así hacer validas las evaluaciones entre sistemas con diferentes características.

En la Figura 4.8 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.



**Figura 4.8:** BER vs SNR para diferente número de taps sin ajuste

Los usuarios entonces pueden evaluar el sistema con los ajustes de potencia correctos y obtener la grafica de la Figura 4.9 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.

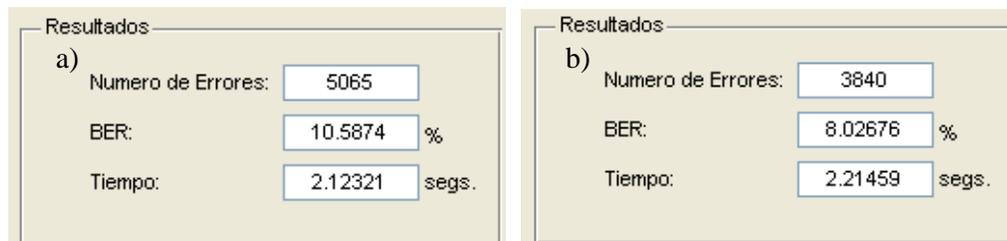


**Figura 4.9:** BER vs SNR para diferente número de taps con ajuste

En este simulador se puede estudiar el sistema considerando un canal únicamente bajo ruido blanco AWGN, en la Figura 4.11 (a) se muestra

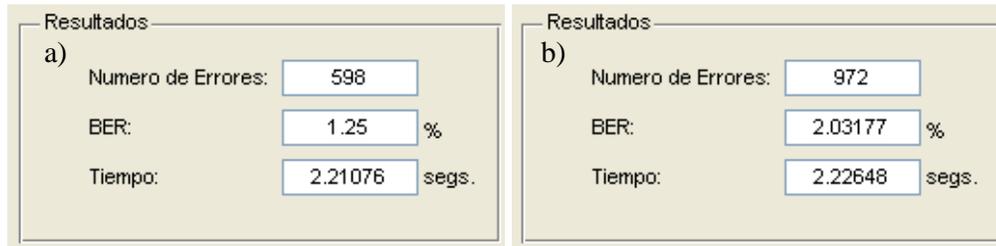
el panel de resultados para un canal AWGN con 0dB, de acuerdo a los resultados se obtiene una BER de alrededor del 9% para la transmisión OFDM MIMO.

Cambiando el parámetro de simulación para que sea ahora un canal multitrayectoria con desvanecimiento plano tendremos los resultados de la Figura 4.11 (b), donde podemos observar que la BER obtenida es de 6%, ambas simulaciones se han efectuado con SNR 0dB.



**Figura 4.10:** Panel de resultados Alamouti-OFDM a 0dB en canal: a) AWGN y b) Flat Fading.

Tomando una SNR de 5dB y repitiendo el proceso se obtienen los resultados de la Figura 4.12:



**Figura 4.11:** Panel de resultados Alamouti-OFDM a 5dB en canal: a) AWGN y b) Flat Fading.

Se han considerado retransmisiones en el simulador para poder tener tres mediciones y poder realizar el análisis por la tendencia y promedio de esas tres mediciones, se ha repetido el proceso descrito para diferentes valores de SNR y dos tipos de canales, los resultados se muestran en la Tabla VIII.

La Tabla VIII muestra que para SNR de 0dB los valores de BER obtenidos para canales únicamente AWGN son mayores que para los canales con desvanecimiento plano. Para valores cercanos a los 5dB la Tabla VIII muestra que los valores de BER para un canal AWGN y un canal con Desvanecimiento Plano son muy cercanos entre ellos. Por último en 9dB la Tabla VIII muestra que los valores obtenidos de BER para canales con desvanecimiento Plano son mayores que para canales con únicamente AWGN.

De acuerdo a la tabla hay dos comportamientos de la BER para el sistema de Alamouti, este resultado se puede apreciar en la Figura 4.7 donde ya se había establecido la curva BER para el esquema de Alamouti bajo AWGN y bajo desvanecimiento plano y su comparación con el SISO bajo desvanecimiento plano, en dicha figura se puede identificar el comportamiento descrito por la Tabla VIII, que corresponde que para valores menores a alrededor de 5dB de SNR un canal únicamente bajo ruido AWGN tendrá un peor comportamiento en términos de BER que un canal multitrayectoria con desvanecimiento plano.

Es decir que para valores de SNR realmente bajos usando el esquema de Alamouti un canal multitrayectoria tendrá mejor comportamiento con respecto a BER que un canal únicamente bajo AWGN.

<b>SNR</b>	<b>BER (%): AWGN</b>	<b>BER (%): Flat Fading</b>
0.6	9.28	6.56
	9.14	6.30
	9.24	5.91
4.6	1.68	1.62
	1.78	1.96
	1.81	2.51
5	1.43	2.34
	1.32	1.62
	1.49	1.82
9	0.0188	0.4619
	0.0209	0.4389
	0.0146	0.3511

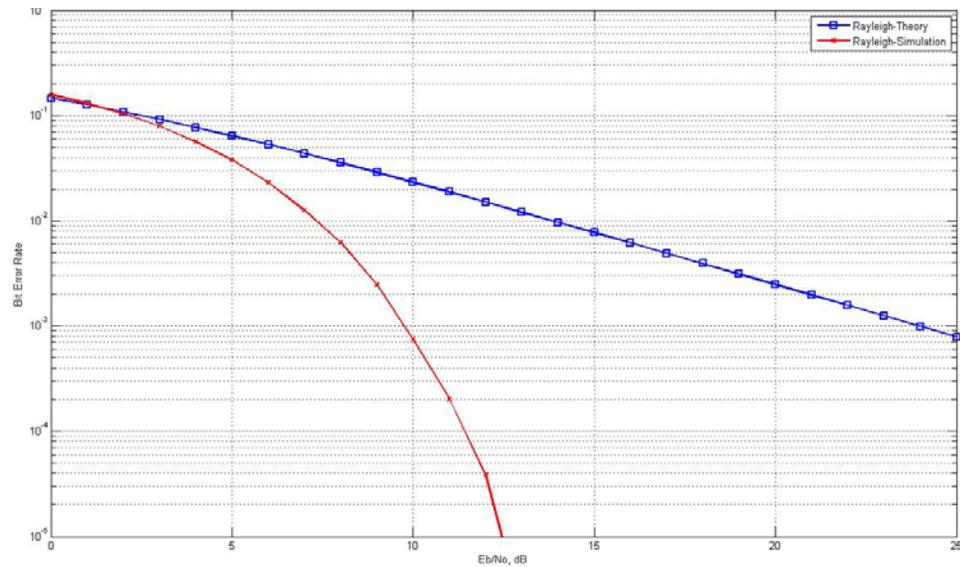
**Tabla VIII:** Tabla de Evaluación Alamouti OFDM

Realizando un procedimiento similar pero usando el modo de transmisión SISO OFDM del simulador, obtendremos los resultados de la Tabla IX:

<b>SNR</b>	<b>BER (%): AWGN</b>	<b>BER (%): Flat Fading</b>
0.6	9.13	10.31
	9.22	10.51
	9.17	10.08
4.6	1.77	4.65
	1.78	4.71
	1.70	4.34
5	1.37	4.02
	1.31	4.41
	1.38	4.68
9	0.020	1.76
	0.016	1.83
	0.010	2.07

**Tabla IX:** Tabla de Evaluación SISO OFDM

En la Tabla IX se puede identificar un claro comportamiento de la curva BER para una transmisión SISO OFDM siempre la BER para canales únicamente AWGN son menores que las BER para un canal con Desvanecimiento Plano, se puede identificar la diferencia con la curva MIMO, la curva SISO OFDM para canales AWGN y un canal con desvanecimiento plano se muestra en la Figura 4.13.



**Figura 4.12:** BER vs. SNR para OFDM SISO en canal AWGN y Flat Fading.

#### 4.4 Evaluación BER vs. SNR variando el numero de antenas

Como se vio en la sección 2.6.3 el aumentar antenas en el receptor provee diversidad en Recepción, en [] se demuestra que la diversidad de transmisión por el código de Alamouti que se ha aplicado en el sistema provee la misma ganancia de diversidad que el esquema de Combinación de Tasa Máxima (MRC) por diversidad en el receptor usando el mismo número de antenas, sin embargo también se establece que Alamouti tendrá una penalidad de 3dB por aumentar la

potencia de transmisión en el sistema, por lo que la curva de MRC estará 3dB por debajo de la curva BER de Alamouti.

El proceso del receptor descrito en la sección 2.6.2 detalla y describe la ecuación que detecta los símbolos codificados por el esquema de Alamouti STC 2x1, en (3) se demuestra que la ecuación que describe la detección en un esquema MRC 1x2 es la misma que la mencionada para Alamouti STC 2x1 y su comportamiento en términos de BER será el mismo pero el esquema de Alamouti en su curva BER se verá penalizado por 3dB dado que al usar 2 antenas transmisoras aumenta la potencia de transmisión usando dos antenas.

Desarrollado el sistema 2x1 Alamouti OFDM y considerando que MRC tiene el mismo esquema de detección para lograr extender el sistema a 2 antenas receptoras, proceso que se describe en la figura 4.10.

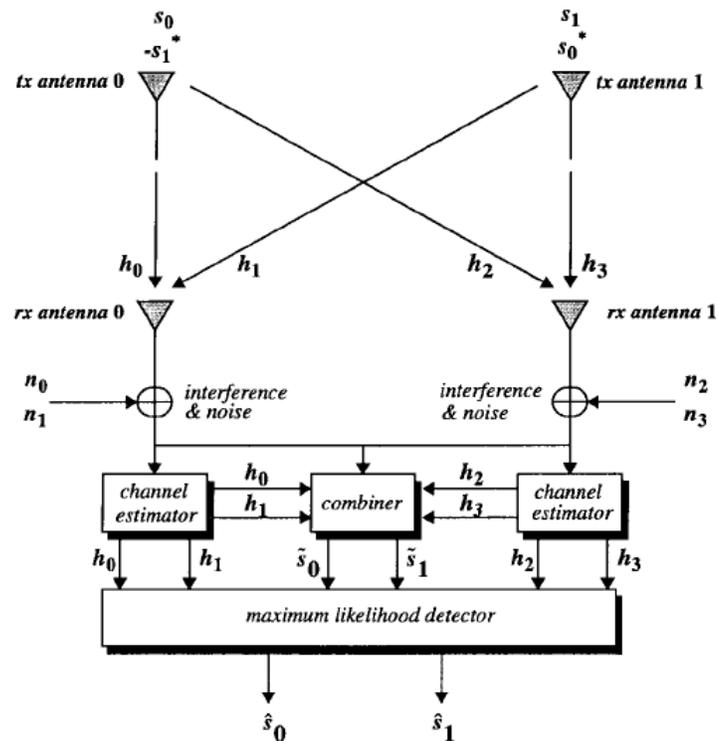


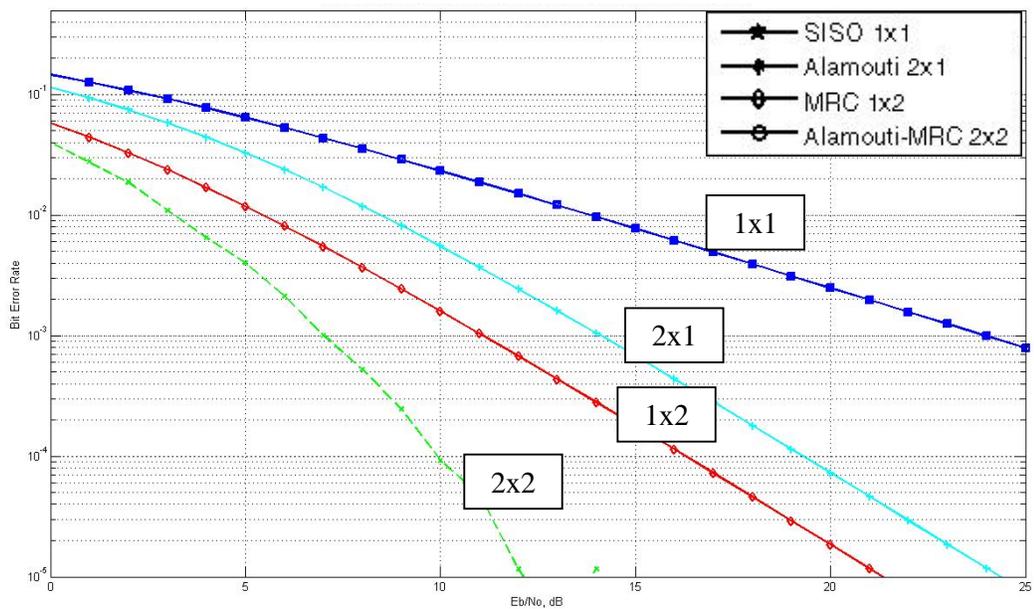
Figura 4.13: Esquema de Alamouti 2x2 (8).

Se duplicó 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 4.11 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 4.14:** BER vs. SNR para 1x1, 2x1, 1x2, 2x2.

Como se mencionó anteriormente la curva 2x1 y 1x2 tienen el mismo comportamiento BER con la diferencia de los 3dB justificada en (7), la curva de resultado de simulación 2x2 (verde) es resultado de la simulación del sistema 2x2 MIMO OFDM basado en las técnicas Alamouti STC y MRC que demuestra que ambas técnicas se pueden combinar obteniendo una mejora en la fiabilidad del sistema que se ve reflejado tomando cualquier punto, por ejemplo para obtener una BER de  $10^{-3}$  en un sistema SISO OFDM 1x1 se necesitan 24dB y en un sistema MIMO OFDM 2x2 se necesitan solo 7dB obteniendo una diferencia significativa de alrededor de 17dB.

En la Tabla X se han tomado datos de acuerdo a la evaluación de la transmisión de una imagen como la descrita en la sección 4.2 basados en la GUI del Simulador cambiando el parámetro de SNR usando los controles de la GUI para los tres tipos de simulación, la tabla representa numéricamente lo antes descrito y se puede comparar los 3 sistemas que se evalúan en el simulador.

SNR	BER (%) en Flat Fading Channel		
	1x1 SISO OFDM	2x1 MIMO Alamouti OFDM	2x2 MIMO Alamouti-MRC OFDM
0	11.30	7.91	1.81
	10.88	7.67	1.89
	11.21	7.45	1.91
6	3.57	1.19	0.054
	3.48	1.37	0.027
	3.41	1.74	0.064
10	1.54	0.22	0.0062
	1.58	0.26	0.0010
	1.67	0.29	0.0020

**Tabla X:** Evaluación 1x1, 2x1, 2x2

Como anexo se presenta el código de MATLAB que se ejecuta para formar la interfaz y los diferentes algoritmos que generan los resultados de las gráficas y de las simulaciones para las señales transmitidas y recibidas.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

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.

Esta plataforma desarrollada no solo sirve como herramienta de soporte sino también tiene capacidades de desarrollo para trabajos futuros, entre los cuales se puede destacar que toda la funcionalidad desarrollada para el sistema en especial el algoritmo de transmisión con la generación de las señales transmitidas en conjunto con el algoritmo de recepción pueden ser utilizados como base fundamental de un prototipo "OFFLINE", dichos prototipos se basan en realizar el procesamiento de señales en receptor y transmisor no en tiempo real por lo que al sistema desarrollado se lo podría aplicar en este esquema.

## BIBLIOGRAFÍA

1. JERUCHIM, M. C., BALABAN, P., and SHANMUGAN, K. S.,  
Simulation of Communication Systems, Second Edition, New York,  
Kluwer Academic/Plenum, 2000.
2. K. WITRISAL, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM):  
Concept and System-Modeling, Technical University Graz, Austria, VL:  
Mobile Radio Systems, Ch. 5: Wideband Systems, 24-Nov-05.
3. T. S. RAPPAPORT, Wireless Communications: Principles and Practice  
(2nd Edition), Prentice Hall, 2002.
4. ANDREWS, J G., GHOSH A. y MUHAMED, R., Fundamentals of  
Wimax, Prentice Hall. 2007.
5. OLSON, M., A Rapid Prototype of an IEEE802.11a Synchronizer,  
Linköping University, Linköping, Suecia. Noviembre 13, 2002.

6. Y. LI and G. L. STÜBER, Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications, Springer, 2007.
7. ANDREWS, J G., GHOSH A. y MUHAMED, R., Fundamentals of Wimax, Prentice Hall. 2007, páginas 149-190
8. 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.
9. GOLDSMITH A. J. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
10. ALAMOUTI S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8):1451–1458, October 1998.
11. GESBERT D., SHA M., SHIU D., SMITH P. J., NAGUIB AND A. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 21(3):281–302, April 2003.

12. M. CHIANI, M. Z. WIN, AND A. ZANELLA. On the capacity of spatially correlated MIMO Rayleigh-fading channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10):2363–2371, October 2003.
13. R. W. HEATH, S. SANDHU, AND A. PAULRAJ. Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers. *IEEE Communications Letters*, 5(4):142–144, April 2001.
14. A. MADHAVA HEBBAR, Empirical Approach for Rate selection in MIMO OFDM, Virginia Polytechnic Institute 2004, pag. 6-55.
15. A. VAN ZELST, R. VAN NEE and G.A. AWATER, Space Division Multiplexing (SDM) for OFDM systems, *IEEE Vehicular Technology Conf. 2000 - Spring*, pp. 1070-1074, May 2000.
16. Y. XIAO, IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs Memphis Univ., TN, USA; *Wireless Communications*, IEEE Dec. 2005 Volume: 12, Issue: 6 pages: 82- 91
17. T. LEE, MIMO Techniques for Wireless Communications, Department of communication Engineering National Chiao Tung University,

18. A. J. PAULRAJ, R. NABAR AND D. GORE, Introduction to space-time wireless communications, Cambridge University Press, 2003.
19. H. BOCSKEI AND A. J. PAULRAJ, Multiple-input multiple-output (MIMO) wireless systems, Cambridge University Press, 2003.
20. D. GESBERT, M. SHAFI, D. SHIU, P. J. SMITH AND A. NAGUIB, "From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 21, no. 3, pp. 281-302, April 2003.
21. G. J. FOSCHINI AND M. J. GANS, "On limits of wireless communications in a fading environment using multiple antennas," Wireless Personal Commun., vol. 6, no. 3, pp. 311-355, 1998.

# **ANEXOS**

```

% Archivo:          ImagenMIMOOFDM.m
% Tipo:            Procedimiento
% Descripcion:     De acuerdo a una SNR específica ingresada por el
%                 usuario realiza la Simulación de la Transmisión de una
%                 imagen en blanco y negro por un canal multicamino en un
%                 sistema MIMO OFDM (2x1) usando STC y 2x2 usando MRC.
%                 Figura 1: Muestra la Imagen Original
%                 Figura 2: Muestra la Imagen Recuperada con MIMO OFDM

tic, clc
nFFT_MRC          = 64;                % Tamaño FFT
nDSC_MRC          = 52;                % Numero de SubPortadoras de
Información
nBitPerSym_MRC   = 52;                % Numero de bits por Símbolo OFDM
(same as the number of subcarriers for BPSK)
nSym_MRC         = 1756;              % Numero de Símbolos (1754 para Imagen)
% nTap            = 1;                % Numero de "Taps" del canal.
simBer_MRC       = 1;                % Bandera para Iniciar cálculo de
porcentaje de BER.
AJUSTE_MRC       = 2;                % AJUSTE_MRC_OFDM de Bits para
Imágenes.
CONTADOR_MRC     = 0;

imagen1_MRC = imread(nombreArchivo);  % Lee la Imagen, Resultado: Cubo
imagenbits_MRC = im2bw(imagen1_MRC);  % Convierte a B/N, Resultado:
Matriz
if (size(imagenbits_MRC,1)>500 || size(imagenbits_MRC,2)>500) % Resize a Imagen
mayores que 500
    imagenbits_MRC = imagenbits_MRC(1:3:end,1:3:end);      % Downsample de 3
end;

largoImagen_MRC = size(imagenbits_MRC,1); % Primera Dimension (M)
anchoImagen_MRC = size(imagenbits_MRC,2); % Segunda Dimension (N)

nSym_MRCIdeal = ceil(largoImagen_MRC*anchoImagen_MRC/nBitPerSym_MRC); % Numero de
Símbolos Ideal
if mod(nSym_MRCIdeal,2) % Símbolos deben ser Pares.
    nSym_MRCIdeal=nSym_MRCIdeal+1;
end;

while(simBer_MRC>0.4) % Bucle de Proceso Principal
    nSym_MRCIdeal=nSym_MRCIdeal+AJUSTE_MRC; % Numero de Símbolos + Ajuste
    ipBit_MRC = [reshape(imagenbits_MRC,1,largoImagen_MRC*anchoImagen_MRC) zeros(1,
(nSym_MRCIdeal*nBitPerSym_MRC-anchoImagen_MRC*largoImagen_MRC))];
    nSym_MRC = nSym_MRCIdeal; % Se define el numero de Símbolos
    % ipBit_MRC = rand(1,
nBitPerSym_MRC*nSym_MRC) > 0.5; % random 1's and 0'
    ipMod_MRC = 2*ipBit_MRC-1; % Modulación BPSK 0 --> -1, 1 -->
+1
    ipMod_MRC = reshape(ipMod_MRC,nBitPerSym_MRC,nSym_MRC).'; % Creación de
nSym_MRC símbolos de nBitPerSym_MRC bits por símbolo.
    % Creación de Símbolos en el Dominio de la

```

## Frecuencia y Zero Padding.

```

originales = [zeros(nSym_MRC,6) ipMod_MRC(:,[1:nBitPerSym_MRC/2]) zeros(nSym_MRC,1)
ipMod_MRC(:,[nBitPerSym_MRC/2+1:nBitPerSym_MRC]) zeros(nSym_MRC,5)] ;
%Tiene los símbolos [s1; s2; s1; s2... ]

```

## Matriz de nSym\_MRC\*nFFT\_MRC

```

%Tiene los símbolos Alamouti
%[-s2*; s1*; -s2*; s1*... ] Matriz de

```

## nSym\_MRC\*nFFT\_MRC

```

antena1 = zeros(nSym_MRC,nFFT_MRC); %Antena 1 [s1; -s2*; s1; -s2*; ...]
antena1([1:2:end],:) = originales([1:2:end],:);
antena1([2:2:end],:) = -1*conj(originales([2:2:end],:));

```

```

antena2 = zeros(nSym_MRC,nFFT_MRC); %Antena 2 [s2; s1*; s2; s1*; ...]
antena2([1:2:end],:) = originales([2:2:end],:);
antena2([2:2:end],:) = conj(originales([1:2:end],:));

```

```

antena1 = (1/sqrt(2))*antena1;
antena2 = (1/sqrt(2))*antena2;

```

```

antena1_t = (nFFT_MRC/sqrt(nDSC_MRC))*ifft(fftshift(antena1.')).';
antena2_t = (nFFT_MRC/sqrt(nDSC_MRC))*ifft(fftshift(antena2.')).';

```

```

antena1_t = [antena1_t(:,[(nFFT_MRC*3/4+1):nFFT_MRC]) antena1_t];
antena2_t = [antena2_t(:,[(nFFT_MRC*3/4+1):nFFT_MRC]) antena2_t];

```

## if (EnableMultipath)

```

h = 1/sqrt(2)*1/sqrt(nTap)*[randn(nSym_MRC,nTap) + j*randn(nSym_MRC,nTap)];
h2= 1/sqrt(2)*1/sqrt(nTap)*[randn(nSym_MRC,nTap) + j*randn(nSym_MRC,nTap)];

```

## else

```

h = 1/sqrt(2)*ones(nSym_MRC,1); % FLAT UNITY channel
h2 = 1/sqrt(2)*ones(nSym_MRC,1); % FLAT UNITY channel

```

## end;

## %%%%% Evaluando

```

hF = fftshift(fft(h,64,2));
hF2 = fftshift(fft(h2,64,2));

```

```

fprintf('ESTADO: Obteniendo respuesta en el Dominio de la Frecuencia del
Canal\n');

```

```

a = zeros(nSym_MRC,nTap);
a(1:2:end,:) = h(1:2:end,:);
a(2:2:end,:) = h(1:2:end,:);

```

```

c = zeros(nSym_MRC,nTap);
c(1:2:end,:) = h2(1:2:end,:);
c(2:2:end,:) = h2(1:2:end,:);

```

```

b = zeros(nSym_MRC,nTap);
b(1:2:end,:) = h(2:2:end,:);
b(2:2:end,:) = h(2:2:end,:);

```

```

d = zeros(nSym_MRC,nTap);
d(1:2:end,:) = h2(2:2:end,:);
d(2:2:end,:) = h2(2:2:end,:);

```

```

%h_antena1=hMod(1,:).';

```

```

%h_antena2=hMod(2,:).';

clear y_antena1
clear y_antena12
clear y_antena2
clear y_antena22

fprintf('ESTADO: Transmitiendo señal Antena 1\n');
for jj = 1:nSym_MRC
    y_antena1(jj,:) = conv(a(jj,:),antena1_t(jj,:));
    y_antena12(jj,:) = conv(c(jj,:),antena1_t(jj,:));
end
fprintf('ESTADO: Transmitiendo señal Antena 2\n');
for jj = 1:nSym_MRC
    y_antena2(jj,:) = conv(b(jj,:),antena2_t(jj,:));
    y_antena22(jj,:) = conv(d(jj,:),antena2_t(jj,:));
end

y = y_antena1+y_antena2;
y2= y_antena12+y_antena22;
fprintf('ESTADO: Recibiendo señal Total (Multicamino + 2 Antenas)\n');
%%AGREGADO%%
yVirada = reshape(y.',1,nSym_MRC*(80+nTap-1));
yVirada2= reshape(y2.',1,nSym_MRC*(80+nTap-1));

nt = 1/sqrt(2)*[randn(1,nSym_MRC*(80+nTap-1)) + j*randn(1,nSym_MRC*(80+nTap-
1))];
nt2 = 1/sqrt(2)*[randn(1,nSym_MRC*(80+nTap-1)) + j*randn(1,nSym_MRC*(80+nTap-
1))];

fprintf('ESTADO: Agregando Ruido Blanco en el Receptor\n');
yt = sqrt(80/64)*yVirada + 10^(-SNRPUESTA/20)*nt;
yt2= sqrt(80/64)*yVirada2 + 10^(-SNRPUESTA/20)*nt2;

yt = reshape(yt.',80+nTap-1,nSym_MRC).';
yt2 = reshape(yt2.',80+nTap-1,nSym_MRC).';

y = yt;
y2 = yt2;
%%AGREGADO%%

%%%%%%%%%% RECEPTOR %%%%%%%%%%%
fprintf('ESTADO: Procesando en el receptor\n');
% Remover prefijo ciclico
y = y(:,[17:80]); % removing cyclic prefix
y2 = y2(:,[17:80]); % removing cyclic prefix
fprintf('ESTADO: Removiendo Prefijo Ciclico\n');
% Sacar FFT y Formar la Vector de Recepcion [y1 y2*, y1 y2*, ...]
yFTtotal = (sqrt(nDSC_MRC)/nFFT_MRC)*fftshift(fft(y.')).';
yFTtotal2 = (sqrt(nDSC_MRC)/nFFT_MRC)*fftshift(fft(y2.')).';
fprintf('ESTADO: IFFT Procesando\n');
yMod_antena1 = kron(yFTtotal([1:2:end],:),ones(2,1));
yMod_antena12 = kron(yFTtotal2([1:2:end],:),ones(2,1));

yMod_antena2 = kron(yFTtotal([2:2:end],:),ones(2,1));
yMod_antena2 = conj(yMod_antena2);

```

```

yMod_antena22 = kron(yFTotal2([2:2:end],:),ones(2,1));
yMod_antena22 = conj(yMod_antena22);
fprintf('ESTADO: Aplicando regla de símbolos recibidos\n');

%%%%%%%%%
clear hF_antena1
clear hF_antena12
clear hF_antena2
clear hF_antena22
%%%%%%%%%

%Matriz Dominio de Frecuencia (Equalizadora )
hF_antena1 = conj(hF);
hF_antena12 = conj(hF2);

hF_antena2 = zeros(nSym_MRC,nFFT_MRC);
hF_antena22 = zeros(nSym_MRC,nFFT_MRC);

hF_antena2(1:2:end,:) = hF(2:2:end,:);
hF_antena2(2:2:end,:) = -1*hF(1:2:end,:);
hF_antena22(1:2:end,:) = hF2(2:2:end,:);
hF_antena22(2:2:end,:) = -1*hF2(1:2:end,:);

a1 = hF_antena1.*conj(hF_antena1);
c1 = hF_antena12.*conj(hF_antena12);

a2 = hF_antena2.*conj(hF_antena2);
c2 = hF_antena22.*conj(hF_antena22);
fprintf('ESTADO: Formando matriz Ecualizadora en el Dominio de la
frecuencia\n');

% Multiplicacion por coeficientes del canal

yEqual1 = hF_antena1.*yMod_antena1;
yEqual12 = hF_antena12.*yMod_antena12;
yEqual2 = hF_antena2.*yMod_antena2;
yEqual22 = hF_antena22.*yMod_antena22;

fprintf('ESTADO: Ecualizando señal\n');

yEqTotal = yEqual1+yEqual2;
yEqTotal2 = yEqual12+yEqual22;

yHat = yEqTotal./(norm(a1).^2+norm(a2).^2);
yHat2 = yEqTotal2./(norm(c1).^2+norm(c2).^2);

yHat([2:2:end],:) = conj(yHat([2:2:end],:));
yHat2([2:2:end],:) = conj(yHat2([2:2:end],:));

yF = yHat+yHat2;

yMod = yF(:,[6+[1:nBitPerSym_MRC/2] 7+[nBitPerSym_MRC/2+1:nBitPerSym_MRC] ]);
fprintf('ESTADO: Desensamblando Símbolo OFDM\n');

ipMod_MRCHat = 2*floor(real(yMod/2)) + 1;

```

```
ipMod_MRCHat(find(ipMod_MRCHat>1)) = +1;
ipMod_MRCHat(find(ipMod_MRCHat<-1)) = -1;
fprintf('ESTADO: Demodulando señal BPSK\n');

ipBit_MRCHat = (ipMod_MRCHat+1)/2;
ipBit_MRCHat = reshape(ipBit_MRCHat.',nBitPerSym_MRC*nSym_MRC,1).';
fprintf('ESTADO: Recuperando secuencia de Bits\n');

nErr_MRC = size(find(ipBit_MRCHat - ipBit_MRC),2);

simBer_MRC = nErr_MRC/(nSym_MRC*nBitPerSym_MRC);

fprintf('Numero de Errores: %d\nBER: %d %% con AJUSTE_MRC %d nSym_MRCIdeal: %d\n', nErr_MRC, simBer_MRC*100, AJUSTE_MRC, nSym_MRCIdeal);
if(simBer_MRC>0.4)
    fprintf('Hay que Repetir Ajuste \n');
    AJUSTE_MRC = 0;
    nSym_MRCIdeal = nSym_MRCIdeal-2;
end
CONTADOR_MRC = CONTADOR_MRC+1;
fprintf('VECES EJECUTADO: %d \n', CONTADOR_MRC);

end
TIEMPOTRANSCURRIDO_MRC = toc;

recuperados_MRC = ipBit_MRCHat(1:end-(nSym_MRC*nBitPerSym_MRC-
anchoImagen_MRC*largoImagen_MRC));
recuperados_MRC = reshape(recuperados_MRC,largoImagen_MRC,anchoImagen_MRC);
fprintf('ESTADO: Recuperando Imagen\n');
```