



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

## “SISTEMA DE TRANSMISIÓN CON MIMO ACÚSTICO”

### TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título de

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

REALIZADO POR:

Cirlymar Iraida Flores Sánchez

TUTOR:

Ing. Miguel Díaz Díaz

FECHA Y LUGAR:

Caracas, febrero de 2012.



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

## **“SISTEMA DE TRANSMISIÓN CON MIMO ACÚSTICO”**

REALIZADO POR:

Cirlymar Iraida Flores Sánchez

TUTOR:

Ing. Miguel Díaz Díaz

FECHA Y LUGAR:

Caracas, febrero de 2012.

## **Dedicatoria**

*A mi padre,*

*A mi madre*

*Y a todos los que creyeron en mí.*

## Resumen

El presente Trabajo de Grado es una investigación sobre los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) en la cual se verifica su eficaz y efectivo funcionamiento dentro de un sistema de comunicaciones.

Dicha verificación está sustentada a través de una simulación de transmisión y recepción de datos aleatorios realizada en el entorno de MATLAB, y a través de una implementación del sistema acústico con cornetas y micrófonos. Para ello se estudiaron cuatro esquemas de transmisión y recepción con diferente diversidad: SISO que no posee diversidad; MRRC, esquema con diversidad en recepción; Alamouti 1, con diversidad en transmisión y Alamouti 2, esquema con diversidad en transmisión y recepción.

La simulación se realizó para establecer una comparación entre los cuatro sistemas mediante la curva de probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido, para dos modulaciones: BPSK y QPSK. La implementación se ejecutó para los mismos esquemas donde la transmisión y recepción fue mediante cornetas y micrófonos, respectivamente; y se calculó el promedio de la probabilidad de error por bit luego de enviar y recibir datos aleatorios varias veces.

Como resultado de la investigación se muestra las mejoras que permite la aplicación de MIMO como sistema de comunicación acústico apoyado en el comportamiento descrito por la probabilidad de error arrojado por la implementación.

Palabras claves: MIMO – Alamouti – Diversidad – Sistema Acústico – SISO.

## Índice General

Dedicatoria .....	i
Resumen .....	ii
Índice General .....	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tablas .....	vii
Introducción.....	1
Capítulo I – Planteamiento del Proyecto.....	3
I.1.- Planteamiento del Problema.....	3
I.2.- Objetivos .....	5
I.2.1.- Objetivo General.....	5
I.2.2.- Objetivos Específicos.....	5
I.3.- Justificación.....	6
I.4.- Alcances y Limitaciones .....	6
I.4.1.- Alcances .....	6
I.4.2.- Limitaciones .....	6
Capítulo II – Marco Teórico.....	8
II.1.- Múltiples Entradas - Múltiples Salidas.....	8
II.2.- Código de Alamouti. ....	10
II.3.- Capacidad del canal MIMO. ....	16
II.4.- Transmisión Digital.....	18
II.4.1.- Modulaciones .....	19
II.4.1.1.- BPSK: Desplazamiento de fase binaria.....	19
II.4.1.2.- QPSK: Cuadratura PSK .....	21
II.4.1.3.- QAM M-aria: 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) .....	26
Capítulo III – Metodología y Desarrollo.....	30
III.1.- Metodología.....	30
III.2.- Desarrollo .....	30
III.2.1.- Fase I: Levantamiento de la información. ....	30
III.2.1.1.- Teoría de los sistemas MIMO: .....	31
III.2.1.2.- Transmisión digital: .....	32
III.2.2.- Fase II: Diseño e Implementación.....	32
III.2.2.1.- Etapa 1: Determinación de Parámetros.....	33
III.2.2.2.- Etapa 2: Respuesta del Canal. ....	33
III.2.2.3.- Etapa 3: Modulaci3n BPSK. ....	36
III.2.2.4.- Etapa 4: Modulaci3n QPSK. ....	37
III.2.2.5.- Etapa 5: Modulaci3n 16QAM .....	41
III.2.2.6.- Proceso de Transmisi3n. ....	42
III.2.2.7.- Proceso de Recepci3n. ....	46
III.2.3.- Fase III: Pruebas y Optimizaci3n del Proyecto.....	52
III.2.3.1.- Prueba 1: Verificaci3n de transmisi3n y recepci3n. ....	52
III.2.3.2.- Prueba 2: Curva de Probabilidad de Error. ....	53
III.2.3.3.- Implementaci3n. ....	54

Capítulo IV – Análisis de Resultados .....	59
IV.1.- Resultados 1: Respuesta del Canal. ....	59
IV.2.- Resultados 2: Curva BER vs. $E_b/N_0$ .....	62
IV.3.- Resultados 3: Implementación.....	67
Capítulo V - Conclusiones y Recomendaciones .....	69
V.1.- Conclusiones.....	69
V.2.- Recomendaciones.....	70
Bibliografía.....	71
Anexos .....	73
Anexo I.- Especificaciones Técnicas de conectores y puertos de Macbook 13’’... ..	73
Anexo II.- Especificaciones Técnicas del adaptador USB-Audio.....	76
Anexo III.- Especificaciones Técnicas del Sistema de audio.....	77
Cornetas.....	77
Micrófonos.....	80

## Índice de Figuras

Figura II.1.- Sistema de múltiples entradas y múltiples salidas. [1].....	8
Figura II.2.- MRRC de 2 ramas. [3] .....	11
Figura II.3.- Representación de la técnica de dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras. [3].....	14
Figura II.4. Comparación de distintas curvas de probabilidad de error por bit. [3] ...	16
Figura II.5.- Transmisor BPSK. [6] .....	20
Figura II.6.- Constelación BPSK. [7].....	20
Figura II.7.- Receptor BPSK. [7].....	21
Figura II.8.- Constelación QPSK con bits Codificación Gray. [5].....	22
Figura II.9.- Esquema del transmisor de señales QPSK coherentes.....	23
Figura II.10.- Esquema del receptor de señales QPSK coherentes.....	24
Figura II.11.- Transmisor 16QAM. ....	27
Figura II.12.- Constelación de una señal 16QAM. [7] .....	28
Figura III.1- Fases de la metodología empleada.....	30
Figura III.2.- Mapa mental del marco teórico. ....	31
Figura III.3.- Esquema de la respuesta del canal. ....	34
Figura III.4.- Transmisor BPSK. ....	36
Figura III.5.- Receptor BPSK.....	37
Figura III.6.- Esquema de la parte real del símbolo a transmitir en QPSK.....	38
Figura III.7.- Esquema de la función <i>bitmodc</i> .....	39
Figura III.8.- Esquema de la función <i>bitmods</i> .....	40
Figura III.9.-Receptor QPSK.....	40
Figura III.10.- Primer cuadrante de la constelación 16QAM.....	42
Figura III.11.- Sistema SISO.....	43
Figure III.12.- Sistema MRRC. ....	44
Figura III.13.- Sistema Alamouti 1.....	44
Figura III.14.- Sistema Alamouti 2.....	45
Figura III.15.- Datos a enviar en el tiempo $t$ .....	46
Figura III.16.- Datos a enviar en el tiempo $t+T$ . ....	46
Figura III.17.- Receptor de los sistemas.....	46
Figura III.18.- Diagrama del transmisor implementado. ....	55
Figura III.19.- Constelación QPSK y sus coordenadas.....	55
Figura III.20.- Diagrama del receptor implementado. ....	57
Figura IV.1.- Respuesta del Canal – Una corneta y un micrófono.....	59
Figura IV.2.- Respuesta del Canal – Una corneta y dos micrófonos.....	60
Figura IV.3.- Respuesta del Canal – Dos cornetas y un micrófono. ....	60
Figura IV.4.- Respuesta del Canal – Dos cornetas y dos micrófonos. ....	61
Figura IV.5.- Curva BER vs. $E_b/N_o$ para modulación BPSK.....	62
Figura IV.6.- Curva BER vs. $E_b/N_o$ para modulación QPSK.....	63
Figura IV.7.- Curva BER vs. $E_b/N_o$ para modulación BPSK para $E_b/N_o = 1,6dB$ .....	64
Figura IV.8.- Curva BER vs. $E_b/N_o$ para modulación BPSK para $E_b/N_o = 3,178dB$ ..	64
Figura IV.9.- Curva BER vs. $E_b/N_o$ para modulación QPSK para $E_b/N_o = 1,678dB$ . 66	

Figura IV.10.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación QPSK para  $E_b/N_0 = 3,178\text{dB}$ .66

## Índice de Tablas

Tabla II.1.- Descripción de canales entre el transmisor y receptor. [3] .....	13
Tabla II.2.- Señales recibidas por las antenas receptoras. [3] .....	13
Tabla II.3. Toma de decisiones en el receptor QPSK. [5].....	23
Tabla III.1. Amplitud y fase correspondiente según el símbolo de entrada.....	39
Tabla III.2. Codificación de los bits de entrada 16QAM. ....	41
Tabla III.3.- Canales según esquemas.....	47
Tabla III.4.- Señales recibidas según esquemas. ....	49
Tabla III.5.- Forma modulada de los bits BPSK. ....	51
Tabla III.6.- Forma modulada de los símbolos QPSK. ....	51
Tabla IV.1.- Probabilidad de error promedio por esquema.....	67

## Introducción

El intercambio masivo de información en la actualidad ha venido creando la necesidad de contar con tecnologías avanzadas o con mejoras efectivas en los sistemas ya implementados que permitan optimizar las comunicaciones alámbricas e inalámbricas. La actual demanda de altas velocidades de transmisión en los sistemas inalámbricos conducen a la aplicación de técnicas de modulación y de codificación de la señal que permitan una mayor calidad en la comunicación a fin de lograr una transmisión confiable y eficaz que alcance enviar y recibir la mayor cantidad de información en el menor tiempo posible, para así satisfacer las necesidades y exigencias de los usuarios finales.

El sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) sugiere una solución eficiente que permite obtener altas velocidades de transmisión y una reducción en la probabilidad de error ofreciendo una convergencia entre las características espaciales del canal y la diversidad temporal, sin sacrificar ancho de banda ni potencia de la señal. Conociendo sus beneficios y características, en el presente Trabajo de Grado se propone la implementación de MIMO como sistema de transmisión en un ambiente acústico a fin de ser establecido como solución a problemas que requieran una comunicación fiable dentro de un entorno variante.

El Trabajo de Grado está constituido por cuatro capítulos, estructurados de la siguiente manera:

- Capítulo I – Planteamiento del Proyecto: Se presenta el planteamiento y la justificación del problema a resolver con la realización de esta investigación. También se presentan los objetivos a cumplir con el Trabajo, las limitaciones que se produjeron a lo largo del desarrollo y los alcances obtenidos con la implementación.

- Capítulo II – Marco Teórico: Se compone de toda la investigación teórica que sustenta el desarrollo del Trabajo de Grado. Abarca: la teoría del sistema MIMO, la teoría de las modulaciones digitales y el estudio del esquema de Alamouti [3].
- Capítulo III – Metodología y Desarrollo: Comprende de la metodología seguida para la ejecución del Trabajo, y del desarrollo y procedimiento aplicado en cada una de las fases de la investigación.
- Capítulo IV – Análisis de Resultados: Se expone un análisis que permite comprender los resultados arrojados a lo largo del desarrollo de las actividades comprendidas dentro de cada una de las fases de la investigación.

Como parte final del Trabajo de Grado se exponen las conclusiones que se generaron del desarrollo de las fases, la implementación y el análisis de resultados.

“Sistema de transmisión con MIMO acústico” es una investigación innovadora de alcance verificativo, que establece la implementación de una tecnología que es utilizada en los más avanzados sistemas inalámbricos hoy en día, en un entorno donde el canal puede llegar a ser el mismo pero su mayor cambio viene dado por sus terminales.

## **Capítulo I – Planteamiento del Proyecto**

### **I.1.- Planteamiento del Problema**

Las comunicaciones inalámbricas poseen la capacidad de comunicar sin medios físicos. En un esquema general, se conforman por un transmisor, un receptor y como medio de transmisión: las ondas electromagnéticas; su complejidad reside en los distintos escenarios y situaciones en las que se implementen. Un problema muy frecuente es la inestabilidad que se puede generar en los sistemas inalámbricos, y para ello se necesita obtener una red inalámbrica que ofrezca niveles de potencia eficientes que permitan confiabilidad y robustez en la comunicación.

Hoy en día, el avance de técnicas y modelos brindan soluciones que optimizan el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas, MIMO (Multiple Inputs – Multiple Outputs) es una tecnología que implementa el uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor que incrementa la calidad de la transmisión inalámbrica en el sistema de comunicación. Además de aplicar técnicas como la diversidad espacial y la multiplexación espacial, MIMO aprovecha el desvanecimiento causado por la recepción de múltiples señales reflejadas en distintos puntos, para incrementar la respuesta del canal de transmisión mejorando la eficiencia espectral y la velocidad de transmisión, y reduciendo la potencia de transmisión del sistema.

El Grupo de Telecomunicaciones de la Universidad Simón Bolívar (USB) es creado con la visión de ser vanguardistas en las tecnologías de las Telecomunicaciones en Venezuela, aportando soluciones viables a distintos proyectos. Siguen una línea de investigación con el Grupo de Mecatrónica de la misma casa de estudio apoyando los proyectos de control de robots a través de esquemas colaborativos, planteando el uso de la utilización de MIMO acústico como sistema de comunicaciones entre el grupo de robots aprovechando el bajo costo de la electrónica y la robustez que ofrece la tecnología.

Se plantean, entonces, las siguientes interrogantes:

¿Cómo es el funcionamiento de los sistemas MIMO?

¿Cómo la implementación de un sistema de MIMO acústico puede resultar eficiente para el control de robots?

¿Qué investigaciones se están llevando a cabo en Venezuela acerca de esta nueva tecnología?

Formulación del Problema:

¿Cómo implementar un sistema acústico con las características de la tecnología MIMO que permita explicar su eficiencia y aportar solución?

## **I.2.- Objetivos**

### **I.2.1.- Objetivo General**

Implementar un transmisor de señales digitales acústico, con tecnología MIMO de dos dimensiones.

### **I.2.2.- Objetivos Específicos**

1. Investigar la teoría de los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).
2. Estudiar los principios de transmisión digital, modulaciones BPSK, QPSK.
3. Estudiar el funcionamiento de los equipos y módulos a implementar: generadores de señal arbitrarios, modulaciones BPSK, QPSK, Circuitos de detección, contador de bits errados.
4. Determinar los valores de ancho de banda, frecuencia central y tasa de transmisión a utilizar.
5. Implementar la instalación del transmisor y receptor, bajo la plataforma PC con salidas de audio o con circuitos de generación o transmisión.
6. Describir los pasos a seguir para la instalación de los equipos.
7. Realizar mediciones de BER y del comportamiento del sistema a diferentes tasas de transmisión de datos, al transmitir una secuencia de datos conocida.
8. Comparar los resultados teóricos con los prácticos.

### **I.3.- Justificación**

Con la implementación a realizar se busca verificar que MIMO es una tecnología que aprovecha todos los beneficios de la diversidad espacial o del multiplexado espacial, y que junto con un arreglo de transmisores y receptores no sólo mejora la calidad del enlace sino del ancho de banda. Se plantea el uso de herramientas acústicas (micrófonos y cornetas) como forma práctica que puede ser aplicada a distintos escenarios donde la comunicación inalámbrica sea necesaria y donde el sistema MIMO ofrezca una solución efectiva y económicamente accesible.

### **I.4.- Alcances y Limitaciones**

#### **I.4.1.- Alcances**

La implementación se llevó a cabo a través de la utilización del software MATLAB para la elaboración de una simulación que ejecutaba las modulaciones, demodulaciones y el análisis de las señales transmitidas y recibidas.

Se logró la verificación de la eficiencia y las características del sistema MIMO a través de dos transmisores y dos receptores acústicos.

Se realizó una comparación entre resultados teóricos y prácticos junto con un análisis que conlleva a ofrecer MIMO acústico como solución eficaz para distintos escenarios.

#### **I.4.2.- Limitaciones**

En la investigación no se incluyó la implementación de algoritmos de codificación de canal, ni encriptación de la señal, ya que sólo estuvo orientado a la implementación en la capa física.

No se llevó a cabo un análisis económico de la implementación, por ser netamente una investigación demostrativa.

De igual manera no se realizó un estudio de los arreglos de antenas que influyen en el desempeño del sistema MIMO.

## Capítulo II – Marco Teórico

### II.1.- Múltiples Entradas - Múltiples Salidas.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos hoy en día deben ofrecer mayor calidad de servicio, más alcance, más potencia, un ancho de banda eficiente y más importante aún, debe ser posible desplegarlos en distintos ambientes sin sacrificar ningún parámetro que perturbe la comunicación. Para cumplir con estos requerimientos las tecnologías actuales están en constante cambio, por lo que se requiere buscar y aplicar distintas técnicas que ofrezcan robustez a los sistemas de comunicaciones y así mantener la calidad de servicio a ofrecer. MIMO es exactamente esa tecnología requerida que brinda, a través de distintas técnicas de diversidad, un incremento en la tasa de transmisión.

MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) es una tecnología de múltiples antenas en la transmisión y en la recepción (Figura II.1), que permite aumentar la calidad y confiabilidad de las radiocomunicaciones. Su implementación se presenta como una de las tecnologías más eficaces dentro de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, aumentando significativamente la tasa de transferencia de información con la utilización de diferentes canales en la transmisión de datos.

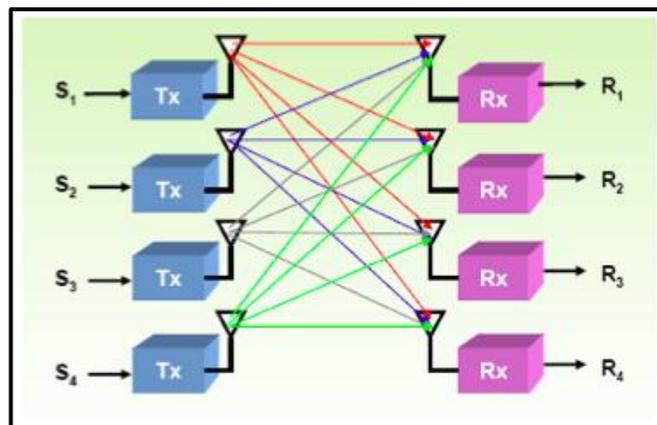


Figura II.1.- Sistema de múltiples entradas y múltiples salidas. [1]

La tecnología presenta tres categorías base que permiten mejorar la calidad del enlace y la capacidad, sin modificar el sistema físicamente:

- a. **Beamforming:** Es una técnica de procesamiento de señal usada para controlar la direccionalidad de la señal de transmisión o recepción en un arreglo de antenas.
- b. **Multiplexación Espacial:** Consiste en transmitir simultáneamente múltiples ráfagas de información de manera independiente dentro de un mismo ancho de banda. En recepción, se separan con un adecuado procesamiento permitiendo un aumento en la eficiencia espectral.
- c. **Diversidad Espacial:** Para disminuir el efecto de desvanecimiento de las señales transmitidas, se realiza una combinación entre dichas señales para propagarlas por distintos caminos. Es comúnmente utilizada en el receptor para mejorar el rendimiento del canal, incrementando la relación señal a ruido (SNR). La codificación espacio-temporal es el esquema de diversidad que se emplea en el extremo transmisor, donde el ejemplo más utilizado es el Código de Alamouti [2].

La fiabilidad de los sistemas MIMO representa un gran avance en el ámbito de la radio comunicación, de tal manera que está integrada en diversos estándares de las redes de acceso inalámbrico de banda ancha como:

- **IEEE 802.16:** Estándar correspondiente a la tecnología WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) diseñado para cubrir las necesidades de las WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks). Está definido en dos versiones: 802.16-2004 para comunicaciones fijas y 802.16-2005 o 802.16e para comunicaciones móviles. MIMO está asociado a WIMAX móvil a través de la utilización del multiplexado espacial, aunque también soporta la diversidad espacial.

- IEEE 802.11n: El conjunto de versiones del estándar 802.11 definen la interfaz para las redes inalámbricas de área local (WLAN) donde 802.11n ofrece un incremento en la velocidad de transmisión de hasta 600Mbps. La tecnología MIMO se enfoca a mejorar el comportamiento del 802.11n a través del beamforming o la diversidad espacial.
- IEEE 802.20: Estándar también como MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) define las especificaciones para la capa física de control de acceso para la interoperabilidad de los sistemas móviles de acceso inalámbrico. Soporta técnicas de procesamiento espacial como MIMO del cual aprovecha característica de beamforming y diversidad espacial para múltiple acceso para ofrecer un alto rendimiento.
- 3GPP (3rd Generation Partnership Project): Es un acuerdo de colaboración para crear la especificación de un sistema de telefonía móvil global. LTE (Long Term Evolution) integra la tecnología MIMO con multiplexado espacial, beamforming y diversidad espacial ofreciendo mayor eficiencia en el sistema, ideal para un servicio de ancho de banda sobre enlaces inalámbricos.

## **II.2.- Código de Alamouti.**

Alamouti diseñó una técnica de diversidad de transmisión basándose en la complejidad computacional de la técnica de Combinación de Recepción de Tasa Máxima (MRRC). Este sistema mejora la calidad del receptor a través de dos antenas transmisoras, que conlleva a una mejora en el comportamiento de los errores, en la tasa de transmisión de datos o en la capacidad del sistema de comunicaciones inalámbrico.

El orden de diversidad de la técnica viene dado al aplicar MRRC con dos antenas en el receptor. Además esta técnica puede ser generalizada para dos antenas en el transmisor y M antenas en el receptor, resultando una diversidad de orden 2M.

El problema fundamental que afecta la transmisión inalámbrica es el desvanecimiento multirrayecto que varía en el tiempo, ya que resulta muy difícil incrementar la calidad o reducir la tasa de error efectiva del canal. Con el sistema propuesto por Alamouti se reduce efectivamente el efecto del desvanecimiento tanto en las unidades remotas como en las estaciones bases sin sacrificar ancho de banda ni requiriendo una potencia adicional a la del sistema.

El caso especial a estudiar es la aplicación del Código de Alamouti para dos antenas en el transmisor y dos antenas en el receptor, para ello se necesita entender cómo trabaja la clásica técnica de MRRC de una antena transmisora y dos antenas receptoras mostrada en la Figura II.2.

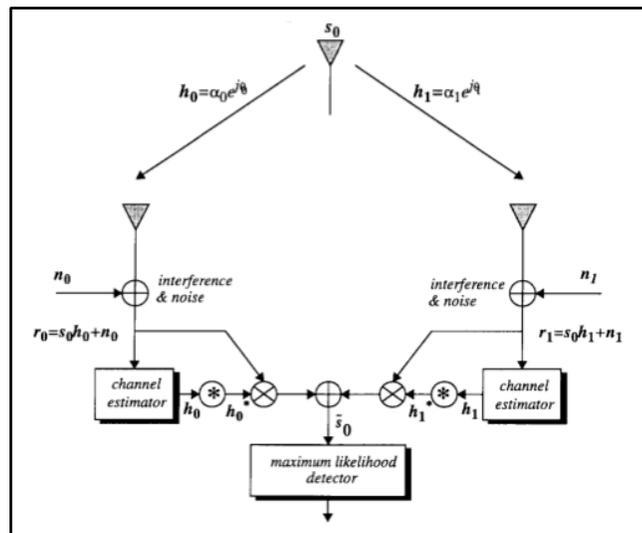


Figura II.2.- MRRC de dos ramas. [3]

El receptor está conformado por dos antenas, dos estimadores de canales y un detector de máxima verosimilitud que arroja una estimación de la señal transmitida a partir de una regla de decisión.

La señal transmitida  $s_0$  se envía por dos canales  $h_0$  y  $h_1$  definidos en la ecuación (1), que se modelan como la multiplicación de una respuesta en amplitud por una respuesta en fase y que incluyen los efectos de la cadena de transmisión y de recepción.

$$\begin{aligned} h_0 &= \alpha_0 e^{j\theta_0} \\ h_1 &= \alpha_1 e^{j\theta_1} \end{aligned} \quad (1)$$

Luego de recibir la señal en cada antena, se suma interferencia y ruido complejo de distribución Gausseana, para obtener la señal recibida en banda base.

$$\begin{aligned} r_0 &= s_0 + n_0 \\ r_1 &= s_1 + n_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Estas señales recibidas pasan por un estimador de canal y por último llegan a un detector de máxima verosimilitud, cuya regla de decisión para la señal recibida consiste en escoger una señal  $s_i$ , sí y sólo sí, se cumple que:

$$d^2(r_0, h_0 s_i) + d^2(r_1, h_1 s_i) \leq d^2(r_0, h_0 s_k) + d^2(r_1, h_1 s_k) \quad \forall i \neq k \quad (3)$$

donde  $d^2(x, y)$  es la distancia Euclidiana al cuadrado entre las señales  $x$  y  $y$ , calculada a través de:

$$d^2(x, y) = (x - y)(x^* - y^*) \quad (4)$$

Sustituyendo y teniendo en cuenta que en las señales cuya energía en la constelación es la misma, se obtiene que  $|s_0|^2 = |s_1|^2 = E_s$ ; la regla de decisión se reduce a:

$$d^2(\tilde{s}_0, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_0, s_k) \forall i \neq k \quad (5)$$

Ahora si se aplica esta técnica a un sistema con dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras (Figura II.3), las señales transmitidas se pueden agrupar en una matriz de transmisión  $S_{Trans}$  dada por:

$$S_{Trans} = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

Los canales entre las antenas transmisoras y receptoras se muestran en la Tabla II.1 y las señales recibidas por las antenas receptoras para los tiempos  $t$  y  $(t+T)$  se muestran en la Tabla II.2.

Tabla II.1.- Descripción de canales entre el transmisor y receptor. [3]

	<b>Antena receptora 0</b>	<b>Antena receptora 1</b>
<b>Antena transmisora 0</b>	$h_0$	$h_2$
<b>Antena transmisora 1</b>	$h_1$	$h_3$

Tabla II.2.- Señales recibidas por las antenas receptoras. [3]

<b>Tiempo</b>	<b>Antena receptora 0</b>	<b>Antena receptora 1</b>
<b>t</b>	$r_0$	$r_2$

$t+T$	$r_1$	$r_3$
-------	-------	-------

Donde las señales recibidas están descritas por:

$$\begin{aligned}
 r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
 r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
 r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
 r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
 \end{aligned} \tag{7}$$

Las salidas estimadas son:

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^* \\
 \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^*
 \end{aligned} \tag{8}$$

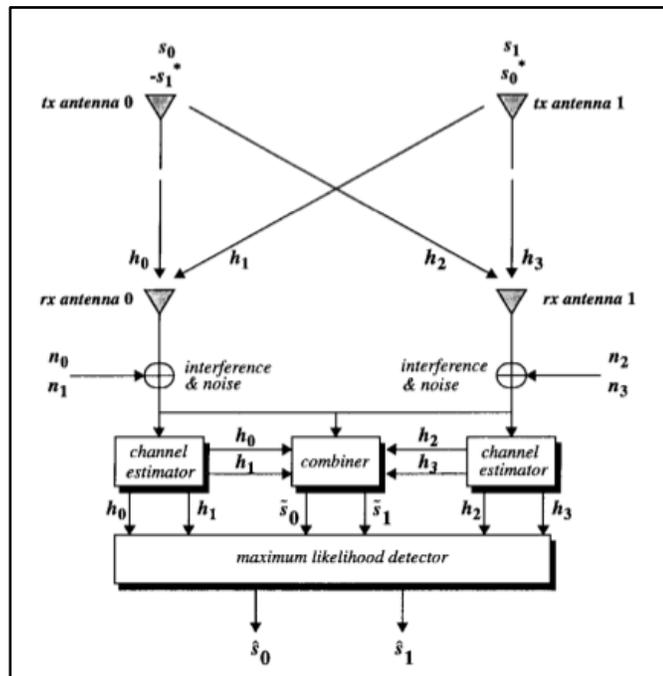


Figura II.3.- Representación de la técnica de dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras. [3]

El comportamiento de los distintos sistemas de diversidad de transmisión se puede observar en la gráfica de BER vs.  $(E_b/N_o)$  mostrada en la Figura II.4. Las curvas de la figura muestran el comportamiento con una modulación BPSK y se asumen los siguientes aspectos:

- El total de la potencia transmitida por las antenas transmisoras del sistema planteado por Alamouti es igual a la potencia que transmite una sola antena en el receptor para MRRC.
- La potencia promedio de la señal desde cada antena transmisora hasta cada antena receptora es la misma.
- El receptor tiene absoluto conocimiento del canal.

Observando las curvas en la Figura II.4, se nota que el nuevo esquema de dos transmisores y un receptor es 3dB menor que MRRC con dos antenas receptoras, esto se debe a que cada antena transmisora radia la mitad de la potencia con el fin de garantizar que la potencia total radiada sea la misma que teniendo una antena transmisora.

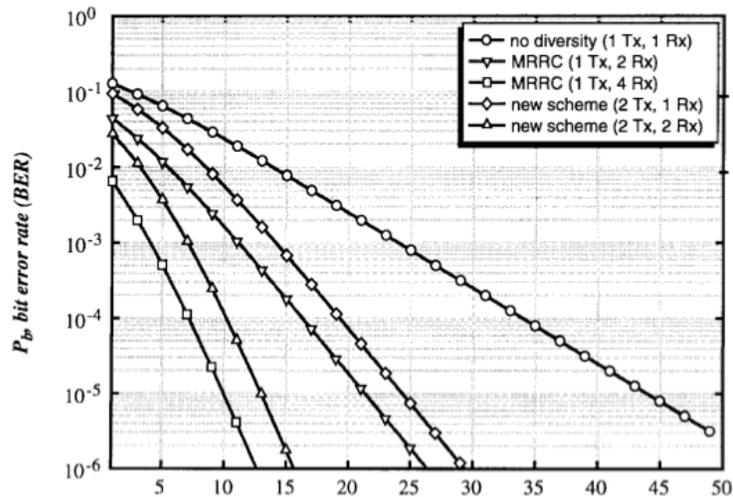


Figura II.4. Comparación de distintas curvas de probabilidad de error por bit. [3]

Citando a Alamouti [3], el sistema es efectivo en todas las aplicaciones donde la capacidad del sistema de comunicaciones inalámbrico se encuentra limitada por el desvanecimiento multitrayecto y por lo tanto es una manera simple y efectiva para suministrar lo que requiere el mercado en cuanto a la calidad y la eficiencia sin un completo rediseño del sistema existente.

### II.3.- Capacidad del canal MIMO.

Los principios de los sistemas MIMO se presentan a través de un análisis matemático basado en el estudio de la capacidad de rendimiento alcanzado, representado por la fórmula de capacidad de Shannon. El comportamiento de la capacidad viene dado por el número de antenas transmisoras y receptoras que posea el sistema, además de la distancia que exista entre ellas.

La fórmula de capacidad de Shannon teóricamente aproxima la máxima tasa de transmisión que puede entregar un canal con un ancho de banda  $B$ , una potencia de la señal transmitida  $P$  y ruido blanco Gausseano  $N_0$ .

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (9)$$

La expresión general de la señal recibida en banda base por un sistema MIMO, es descrita como:

$$y(t) = H(t) \cdot s(t) + n(t) \quad (10)$$

donde:

$$H(t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & L & h_{1,M}(t) \\ M & O & M \\ h_{N,1}(t) & L & h_{N,M}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

es la matriz  $M \times N$ , que describe los canales entre  $M$  antenas transmisoras y  $N$  antenas receptoras .

$s(t)$  es el vector que describe las señales transmitidas por  $M$  antenas.

$n(t)$  es el vector que describe el ruido blanco Gausseano adicionado a las señales transmitidas.

La capacidad del canal de información se define como el máximo valor que puede tomar la información entre  $y(t)$  y  $s(t)$ , y se define como:  $C = \max I(s,y)$  donde  $I(s,y)$  es la diferencia entre la entropía de la señal recibida  $H(y)$  y la entropía condicionada de la señal recibida tal que la señal transmitida ya ocurrió  $H(y/s)$ . Basados en la teoría de probabilidades, la entropía para procesos estadísticos gausseanos se representa como en [4]:

$$H(x) = \log(\det(\pi e V_{xx})) \quad (12)$$

donde:  $\det(\pi e V_{xx})$  se conoce como el determinante de la matriz  $\pi e V_{xx}$

$e$  es la base del logaritmo natural

$V_{xx}$  es la matriz de covarianza del vector  $x$ , definida como la covarianza de dicho vector consigo mismo:

$$V_{xx} = \text{cov}(x,x) = E \{xx^H\} \quad (13)$$

$E \{xx^H\}$  es el valor esperado de  $xx^H$  donde  $x^H$ , por teoría de matrices, es la matriz conjugada traspuesta de  $x$ . La matriz de covarianza, en su diagonal principal, está

conformada por el promedio de la energía existente, mientras que los demás elementos representan la potencia total de la señal.

Aplicando la teoría mencionada, se tiene que la entropía de la señal recibida es:

$$H(y) = \log(\det(\pi e V_{yy})) \quad (14)$$

donde  $V_{yy}$  es la matriz de covarianza de la señal recibida, dada por:

$$V_{yy} = \frac{P_s}{S} (H V_{ss} H^H) + V_{nn} \quad (15)$$

y con  $V_{nn}$  como la matriz de entropía del ruido o la matriz de potencia del ruido representada como:  $V_{nn} = N_0 I$ .

De aquí, la capacidad de un canal MIMO se puede estimar a través de:

$$C = B \log_2 \left( \det \left( I + \frac{P_s}{N N_0} H V_{ss} H^H \right) \right) \quad (16)$$

con:  $I$  matriz identidad

$N$  número de antenas transmisoras

$H$  matriz de los canales de transmisión

$V_{ss}$  matriz de covarianza de la señal transmitida.

## II.4.- Transmisión Digital

La transmisión digital consiste en el envío de información en forma de señales digitales a través de medios físicos. Como las señales no se pueden enviar en unos (1)

y ceros (0) lógicos, previamente al envío se realiza una codificación que transforma la señal digital en una señal con dos niveles. Las codificaciones más utilizadas son: no retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ), que a su vez cada una se dividen en unipolar o polar. La codificación NRZ se caracteriza porque cada bit está representado por un pulso de amplitud  $V$  y tiene una duración de  $t_b$ . La codificación RZ representa cada bit como un pulso de amplitud  $V$  y con una duración de  $\frac{t_b}{2}$ .

Una codificación es polar cuando los niveles de la señal están descritos por  $\pm V$ , mientras que en la codificación unipolar los niveles son  $V$  y  $0$ .

La inmunidad al ruido brinda robustez a la señal haciéndola menos susceptible ante variaciones de amplitud, frecuencia y fase y es la principal ventaja de la transmisión digital.

#### **II.4.1.- Modulaciones**

Un aspecto clave en la transmisión digital, son las modulaciones. La modulación consiste en modificar ciertas características de una onda moduladora a través de una onda portadora, con el fin de que la onda moduladora pueda ser transmitida. Las modulaciones pueden ser por onda continua o por pulsos. El caso a interesar es la modulación por onda continua, donde la onda portadora con forma sinusoidal modifica la amplitud, frecuencia o fase de la onda moduladora. Dichas modulaciones se agrupan en coherentes y no coherentes, “dependiendo de si el receptor está o no equipado con un circuito de recuperación de fase” [5]. El circuito de recuperación asegura que los osciladores que generan la onda portadora, tanto en el receptor como en el transmisor, estén sincronizados en fase y frecuencia.

##### **II.4.1.1.- BPSK: Desplazamiento de fase binaria.**

Es la modulación PSK (Phase-Shift Keying) binaria que contiene desplazamientos de fase de  $\pm\pi$  radianes. Tiene dos fases de salida para una sola frecuencia de la onda portadora. El transmisor BPSK mostrado en la Figura II.5, está conformado por un modulador balanceado, un oscilador local que genera la señal portadora y un filtro pasabajo. El modulador balanceado funciona como un conmutador que permite invertir la fase de la señal moduladora de entrada.

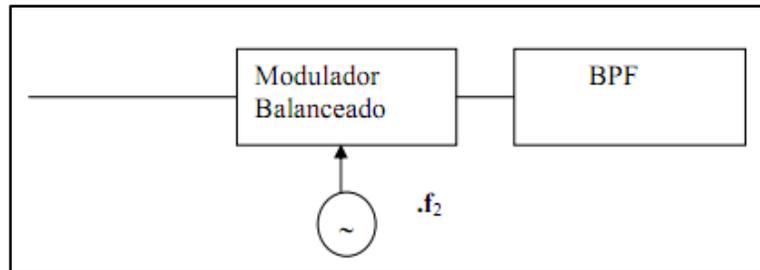


Figura II.5.- Transmisor BPSK. [6]

La constelación de BPSK se muestra en la Figura II.6 y representa la relación amplitud y fase de la onda portadora modulada digitalmente.

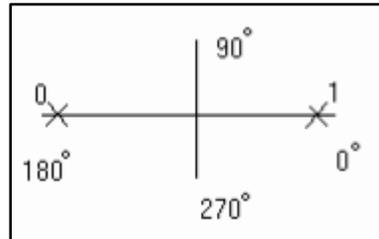


Figura II.6.- Constelación BPSK. [7]

La distancia que existe entre los elementos de la constelación indica cuán resistente es el sistema frente a interferencias o ruido. A mayor distancia, es más fácil para el receptor distinguir entre los niveles.

El receptor BPSK está conformado por el circuito de recuperación, un modulador balanceado y un filtro pasabajo, como se muestra en la Figura II.7. El circuito de recuperación de la portadora se encarga de detectar y regenerar una señal que es coherente tanto en frecuencia como en fase con la portadora del transmisor original [7]. El modulador balanceado arroja como salida el producto entre la señal de entrada BPSK y la portadora recuperada por el circuito, y esta señal pasa por el filtro pasabajo que separa la señal compleja de los datos binarios.

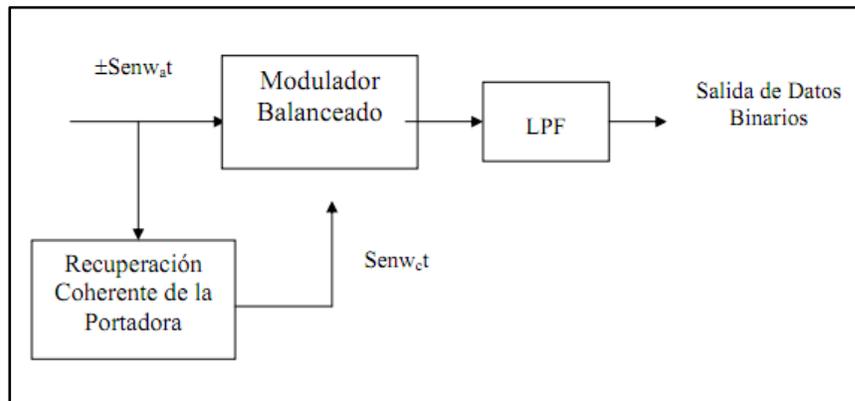


Figura II.7.- Receptor BPSK. [7]

#### II.4.1.2.- QPSK: Cuadratura PSK

Es una técnica de modulación donde se necesitan dos bits en la entrada del modulador para producir cuatro fases de salida para una sola frecuencia portadora. La información que porta la señal está contenida en la fase. La señal QPSK tiene la siguiente forma:

$$x_{QPSK}(t) = \sqrt{P_s} b_p(t) \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{P_s} b_i(t) \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (17)$$

donde:  $P_s$  es la potencia de símbolo

$f_c$  es la frecuencia de la portadora

$b_p(t)$  y  $b_i(t)$  son los bits consecutivos par e impar de entrada.

Reescribiendo la ecuación (17) en función de dos bases ortogonales:

$$u_1(t) = \sqrt{\frac{1}{t_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad u_2(t) = \sqrt{\frac{1}{t_b}} \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (18)$$

se tiene:  $x_{QPSK}(t) = \sqrt{E_b} b_p(t) u_1(t) + \sqrt{E_b} b_i(t) u_2(t) \quad (19)$

La constelación de la señal, tiene ángulos de fase que aumentan en dirección contraria a la de las manecillas del reloj. Como cada símbolo implica dos bits, la energía de la señal por símbolo es el doble de la energía de la señal por bit.

Si a la entrada del sistema se colocan los símbolos con codificación de Gray, se obtendrá unos valores de fase mostrados en la Tabla II.3 con su correspondiente coordenada en la constelación ilustrada en la Figura II.9.

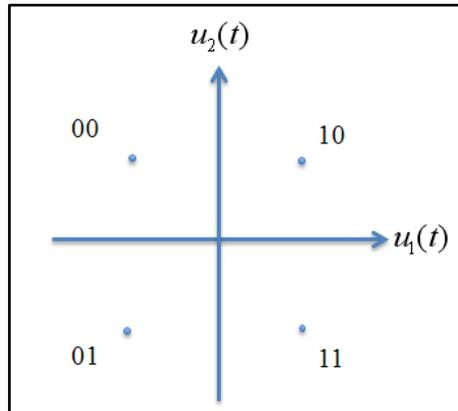


Figura II.8.- Constelación QPSK con bits Codificación Gray. [5]

#### A.- Transmisor QPSK

La entrada del transmisor QPSK contiene una secuencia de datos binarios aleatorios que conforman la señal a modular. Estos bits son pasados por un

codificador NRZ que se encarga de transformarlos en una forma polar, es decir, que el “1” es representado por +V mientras que “0” es representado por -V. Luego ésta onda binaria pasa a un demultiplexor que la divide en dos ondas binarias independientes que se multiplican cada una por  $\phi_1(t) = \cos(2\pi f_c t)$  y  $\phi_2(t) = \text{sen}(2\pi f_c t)$  que modulan la fase y la cuadratura, respectivamente. Al final la señal de salida es la suma de las ondas moduladoras en fase y cuadratura.

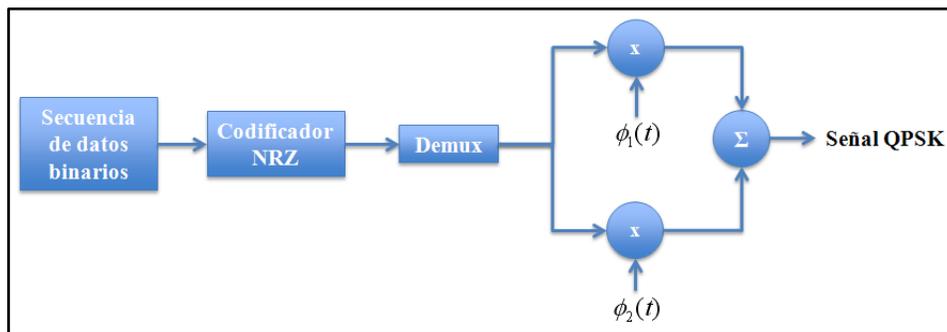


Figura II.9.- Esquema del transmisor de señales QPSK coherentes.

Fuente: Elaboración propia.

### B.- Receptor QPSK coherente

La señal recibida se multiplica con dos señales de referencia que el receptor genera localmente, cada señal pasa por un correlator cuyas salidas son la entrada de un dispositivo de decisión que tiene como umbral el cero (su funcionamiento se muestra en la Tabla II.4). Luego de la toma de decisiones, las ondas binarias que representan del canal de cuadratura y fase se introducen en un multiplexor que las combina y arroja como salida una estimación de la señal binaria transmitida.

Tabla II.3. Toma de decisiones en el receptor QPSK. [5]

	Señal	Símbolo

<b>Canal Fase</b>	$x_1 < 0$	0
	$x_1 > 0$	1
<b>Canal Cuadratura</b>	$x_2 < 0$	0
	$x_2 > 0$	1

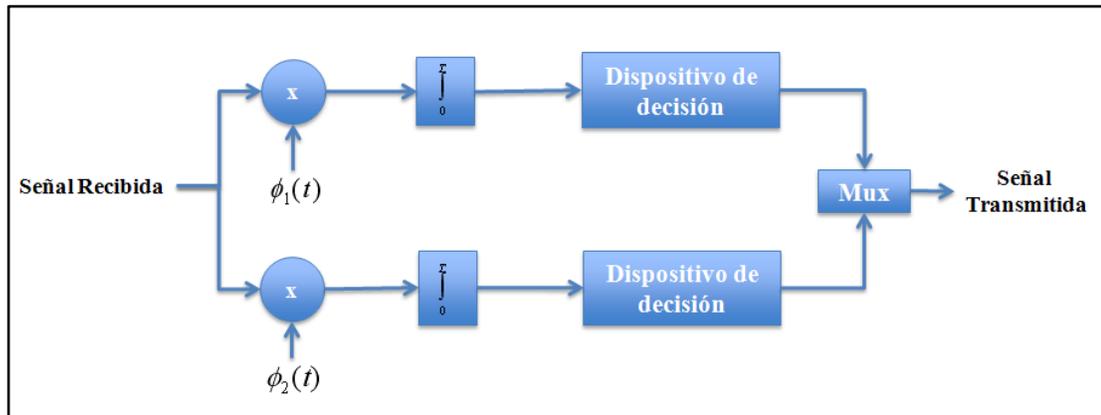


Figura II.10.- Esquema del receptor de señales QPSK coherentes.

Fuente: Elaboración propia.

El ancho de banda de un sistema PSK M-ario viene dado por:

$$B \approx \frac{R_b}{T} \quad (20)$$

donde  $T = t_b \log_2 M$  es la duración de símbolo y  $t_b$  es la duración de bit. La tasa de bits  $R_b$  se define como el inverso de la duración de bits, y escribiendo el ancho de banda en función de la tasa de bits se tiene:

$$B = \frac{W}{1} \frac{2R_b}{2M} \quad (21)$$

Sustituyendo  $M=4$ , el ancho de banda de un sistema QPSK es:  $B = W \frac{1}{t_b}$  (22)

Un sistema QPSK coherente se transmite la información al doble de la tasa de bits que en un sistema PSK coherente para un mismo ancho de banda.

C.- Probabilidad de error:

Para estudiar la probabilidad de error de un sistema QPSK coherente, éste se toma como si fueran dos sistemas PSK binarios coherentes que trabajan en paralelo con sus respectivas portadoras en cuadratura de fase.

De la señal recibida  $x(t) = s_i + w(t)$  con  $w(t)$  como ruido blanco Gausseano de media 0 y espectro de potencia  $\frac{N_0}{2}$ , se toman 2 elementos observables que representan la salida del canal de fase y del canal en cuadratura.

La probabilidad de error de símbolo de una señal QPSK es:

$$P_e = 1 - P_c \quad (23)$$

donde  $P_c = (1 - P')$  es la probabilidad promedio de tomar una decisión correcta, resultante de combinar las salidas de los canales. Mientras que:

$$P' = \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}}\right) \quad (24)$$

es la probabilidad de error de bit en cada canal del sistema.

Sustituyendo la ecuación (29) en  $P_c$ , se obtiene:

$$P_c = 1 - Q\left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}}\right) + \frac{1}{4}\left(Q\left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}}\right)\right)^2 \quad (25)$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación (25) en la (23), la probabilidad de error por símbolo queda como:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}}\right) + \frac{1}{4}\left(Q\left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}}\right)\right)^2 \quad (26)$$

y si se considera  $\left[\frac{E}{2N_o}\right]$ , se puede eliminar el término cuadrático de la ecuación,

y da como resultado que la probabilidad de error por símbolo en QPSK es:

$$P_e \cong Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_o}}\right) \quad (27)$$

Cabe destacar que en la modulación QPSK, la energía de la señal por símbolo es el doble que la energía de la señal por bit, debido a que se envían dos bits por símbolo. Por lo tanto la probabilidad de error en función de la energía de bit se expresa como:

$$P_e \cong Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \quad (28)$$

#### II.4.1.3.- QAM M-aria: 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Es una modulación digital que requiere cuatro bits de entrada para producir 16 señales posibles. La información está contenida en la amplitud y en la fase de la señal portadora transmitida. La señal QAM M-aria que se transmite está definida por:

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_o}{T}} a_k \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_o}{T}} b_k \sin(2\pi f_c t) \quad (29)$$

donde:  $E_o$  es la energía de la señal con amplitud más baja

$a_k$  y  $b_k$  son portadoras en cuadratura de fase.

#### A.- Transmisor 16QAM:

La entrada del transmisor 16QAM (Figura II.11) es una señal de cuatro bits que se divide en dos bits para el canal de fase y otros dos para el canal de cuadratura. Pasan por un convertidor de nivel que produce como salida una señal con cuatro niveles de amplitud que luego se modulan como si fueran señales QPSK.

La constelación de 16QAM (Figura II.12) es una constelación cuadrada, ya que el número de bits por símbolo es par ( $M=16$ ) [5]. La ventaja de una señal 16QAM es que las fases se encuentran más separadas por lo que permiten una amplitud de ruido mayor, el sistema es fuerte al ruido.

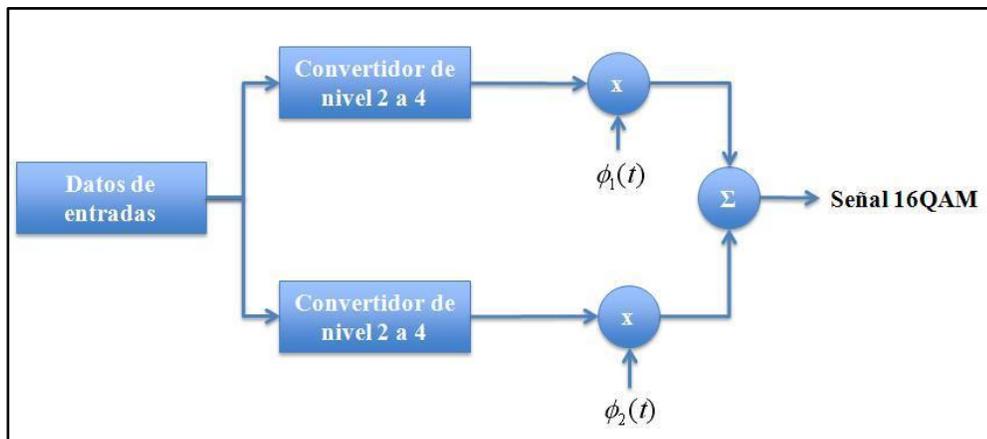


Figura II.11.- Transmisor 16QAM.

Fuente: Elaboración propia.

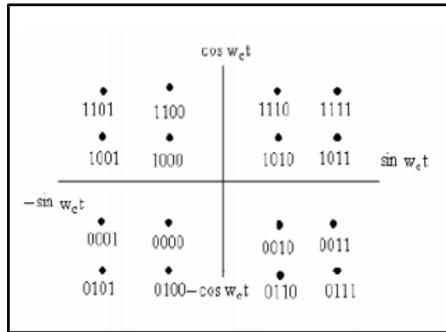


Figura II.12.- Constelación de una señal 16QAM. [7]

B.- Probabilidad de error:

La probabilidad de error por símbolo de una señal QAM M-aria es:  $P_e = 1 - P_c$  donde  $P_c = (1 - P'_e)^2$  es la probabilidad de una detección correcta.  $P'_e$  es la probabilidad de error por símbolo para un señal PAM L-aria  $L = \sqrt{M}$  es definida como:

$$P'_e = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{E_o}{N_o}}\right) \quad (30)$$

Sustituyendo la ecuación (30) en  $P_e$ , la probabilidad de error por símbolo es:

$$P_e = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{E_o}{N_o}}\right) \quad (31)$$

La energía transmitida en QAM M-aria es variable, ya que depende del símbolo en particular que se está transmitiendo, por lo tanto la energía promedio  $E_{p r}$  se utiliza para el cálculo de la probabilidad de error por símbolo, de una señal 16QAM:

$$P_e = \frac{3}{2} Q \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \quad (32)$$

La PSK y la QAM M-aria son ejemplos de modulación lineal, pero ambas se diferencian en un aspecto importante: una señal PSK M-aria tiene una envolvente constante, mientras que una señal QAM M-aria cambia en la amplitud de la portadora.

## Capítulo III – Metodología y Desarrollo

### III.1.- Metodología

La metodología desarrollada para la investigación se enmarca en cuatro fases principales comprendidas de actividades propias que conllevan a la implementación del sistema MIMO acústico. La Figura III.1 contempla las fases aplicadas para el desarrollo sostenible del presente Trabajo de Grado.

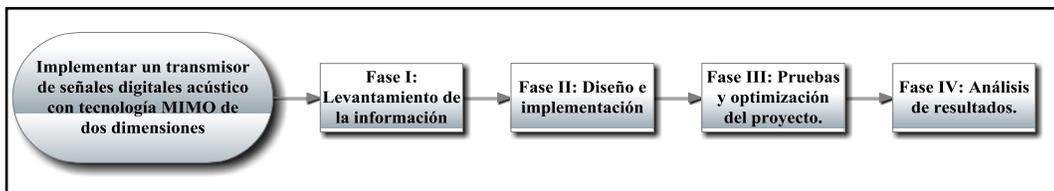


Figura III.1- Fases de la metodología empleada.

Fuente: Elaboración propia.

### III.2.- Desarrollo

A continuación se presenta una explicación detallada de todas las actividades desarrolladas a lo largo de las tres primeras fases de la investigación.

#### III.2.1.- Fase I: Levantamiento de la información.

Esta primera fase se basó en la recopilación de toda la información teórica que sustenta el presente Trabajo de Grado, y se dividió en dos ramas de estudio: la teoría de los sistemas MIMO y la transmisión digital, donde se incluyen los tipos de modulaciones digitales. El marco teórico que respalda la investigación tiene su base en el mapa mental ilustrado en la Figura III.2 que presenta todos los fundamentos teóricos que se trabajaron.

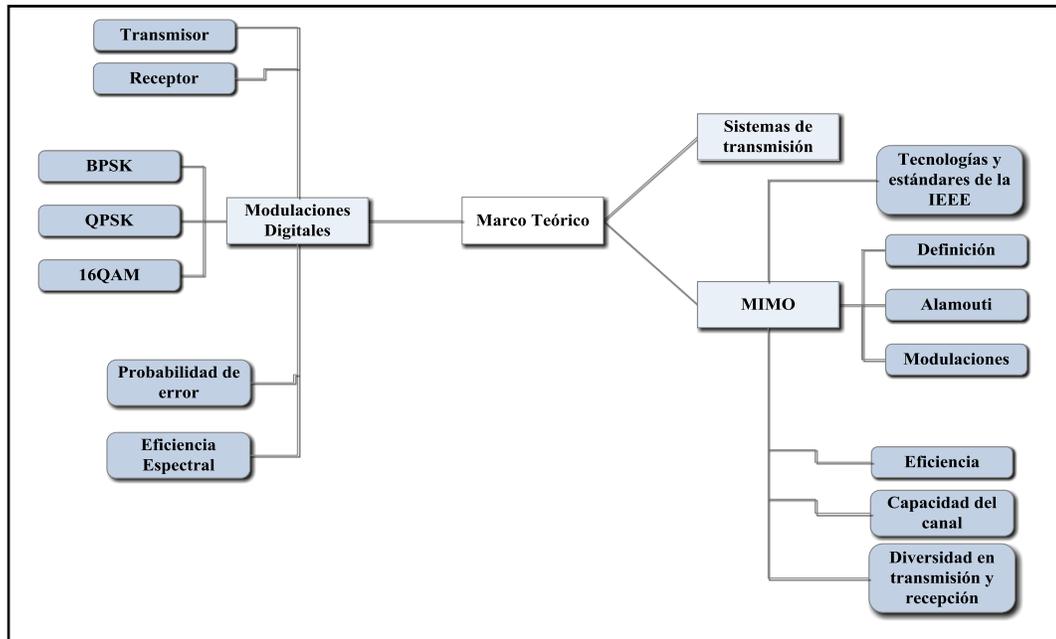


Figura III.2.- Mapa mental del marco teórico.

Fuente: Elaboración propia.

### III.2.1.1.- Teoría de los sistemas MIMO:

El fundamento teórico del Trabajo de Grado era el estudio completo de los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas. Se llevó a cabo a partir de un artículo publicado por la IEEE de Alamouti “*A simple transmit diversity technique for wireless communications*” [3] que basado en el combinador de recepción de tasa máxima (MRRC), propone un sistema que reduce el desvanecimiento multirrayecto sin sacrificar ancho de banda ni potencia de transmisión del sistema. En el artículo, va explicando detalladamente cómo se describen los sistemas con: una antena transmisora y dos antenas receptoras, dos antenas transmisoras y una antena receptora y, por último, dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras. Éste último sistema es la base de teórica de toda la investigación, pudiéndose mencionar las siguientes consideraciones importantes:

- Las señales transmitidas se envían en distintos tiempos  $t$  y  $t+T$ .

- En la matriz  $S_{Trans}$ , se almacenan los símbolos transmitidos, que se caracterizan por su forma compleja: 
$$S_{Trans} = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{pmatrix}.$$
- Tanto el transmisor como el receptor tienen conocimiento del canal.

### III.2.1.2.- Transmisión digital:

Para abordar la teoría de transmisión digital se realizaron consultas bibliográficas sobre los sistemas de comunicaciones en los que se expusiera el fundamento de la transmisión digital y las modulaciones digitales.

Se estudiaron, principalmente las modulaciones digitales en fase: BPSK y QPSK y la modulación en amplitud y cuadratura: 16QAM. Las características específicas que se trataron fueron:

- Constelación.
- Probabilidad de Error.
- Transmisor y Receptor.

### III.2.2.- Fase II: Diseño e Implementación

En esta fase se desarrolló la simulación que permitió la implementación del sistema de transmisión acústico. Se construyó en diferentes etapas hasta obtener el resultado final: el sistema de comunicaciones con transmisión y recepción bajo tecnología MIMO. El sistema simulado se diseñó y ejecutó en el software MATLAB, y se implementó mediante el uso de dos cornetas como transmisores y dos micrófonos como receptores.

### III.2.2.1.- Etapa 1: Determinación de Parámetros.

El primer parámetro que se necesitaba conocer era la frecuencia de muestreo de la tarjeta de sonido de la computadora. A través de la búsqueda de las especificaciones técnicas, se encontró que posee un “puerto de entrada de línea de audio/entrada óptica de audio digital” y un “puerto de salida de auriculares digital óptico” (Anexo I)

El puerto de entrada es una línea analógica o de audio digital óptico que no suministra potencia al dispositivo conectado, por lo que exige la utilización entradas auto-alimentadas. De acuerdo con las especificaciones, la entrada de sonido acepta señales estéreo con una frecuencia de muestreo dentro del rango de 44,1kHz hasta 192kHz a 24bits. Por su parte el puerto de salida de audio estéreo analógico posee un convertidor de 24bits con una frecuencia de muestreo de 44,1kHz hasta 192kHz.

La frecuencia de muestreo escogida para trabajar fue 44,1kHz con la finalidad de aprovechar la calidad de audio de entrada y salida ofrecida por la tarjeta de sonido, pero a medida que se avanzaba en el desarrollo de la investigación se observó que el tiempo de ejecución requerido para realizar las distintas pruebas en MATLAB era muy grande, por lo tanto se tomó la decisión de disminuir el valor a 8kHz.

### III.2.2.2.- Etapa 2: Respuesta del Canal.

En esta siguiente etapa se realizó el estudio de la respuesta del canal para obtener el ancho de banda requerido por el sistema, y con esto determinar el tiempo de símbolo final. Para ello se siguió el presente esquema de la Figura III.3:



Figura III.3.- Esquema de la respuesta del canal.

Fuente: Elaboración propia.

En el transmisor se generó un arreglo de senos con un rango de frecuencias desde 100Hz hasta 6000Hz en saltos de 50Hz. El arreglo se grabó en un archivo de audio *.wav*, usando el comando:

$$\text{wavwrite}(y, f_s, 'TX.wav')$$

cuyos parámetros son:  $y$  es el arreglo de senos

$f_s$  es la frecuencia de muestreo.

$TX$  es el nombre del archivo *.wav*.

La transmisión se realizó a través de un sistema de sonido 2.1 Logitech compuesto por dos cornetas, un subwoofer y un control central conectado a la salida de audio analógico de la computadora. En el Anexo III están contempladas las especificaciones técnicas del sistema de audio.

En el receptor, la grabación del sonido generado en el transmisor se efectuó con un micrófono dinámico unidireccional cuyas especificaciones técnicas están anexadas en el Anexo II. A consecuencia de que la entrada de audio analógico de la computadora utilizada es una línea analógica que no proporciona corriente al dispositivo conectado, se necesitó un adaptador USB-Audio para poder utilizar el micrófono. Este adaptador es un dispositivo compuesto por un circuito integrado que

se encarga de procesar el sonido de entrada o salida de manera similar a una tarjeta de sonido, sus especificaciones técnicas se muestran en el Anexo I.

En MATLAB, el receptor grabó el sonido de entrada a través del comando:

$$\text{wavrecord}(100f_s, f_s, ch)$$

donde 100 es el tiempo de duración (en segundos) del nuevo archivo de audio recibido, mientras que  $100f_s$  es el número de muestras del arreglo que contendrá la señal recibida y  $ch$  indica el número de canales de grabación, donde '1' indica un solo canal de audio (Mono) y '2' indica dos canales (Estereo).

El script receptor se basó en un ciclo en el que por cada arreglo de muestras correspondientes a un seno transmitido, se busca el valor máximo de amplitud para luego mostrar la respuesta del canal a través de un gráfico de amplitudes en función de las frecuencias. A partir de ahí se obtiene la frecuencia central, el ancho de banda necesario para un tiempo de símbolo estable y la atenuación del canal para los distintos escenarios de transmisión y recepción: SISO, con una corneta y un micrófono; MISO, dos cornetas y un micrófono y MIMO, con dos cornetas y dos micrófonos.

Adicionalmente se determinaron los siguientes parámetros:

- Frecuencia de la portadora ( $f_c$ ): Frecuencia de la señal portadora para cada modulación

$$f_c = 1200 \text{ Hz}$$

- Tiempo de muestreo ( $t_s$ ): Es el inverso de la frecuencia de muestreo.

$$t_s = \frac{1}{f_s} = 125 \mu\text{seg}$$

- Tiempo de símbolo ( $t_b$ ): Es el tiempo de duración de cada símbolo. Depende del ancho de banda escogido inicialmente en 0.4Hz.

$$t_b = 5\text{segs}$$

- Tiempo ( $t$ ): Tiempo de duración de las señales. Viene dado por:

$$t = t_s : t_s : t_b$$

### III.2.2.3.- Etapa 3: Modulación BPSK.

La transmisión de la modulación BPSK ilustrada en la Fig. III.4 se simuló a partir de su constelación. Si el símbolo a transmitir es un “uno”, el símbolo modulado viene dado por:

$$1 \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (33)$$

Mientras que si el símbolo a transmitir era un “cero”, su equivalente modulado es de la forma:

$$-1 \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (34)$$

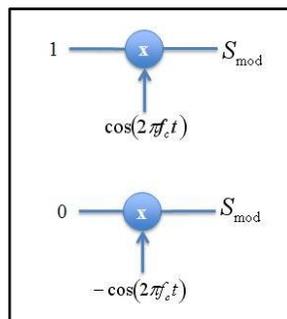


Figura III.4.- Transmisor BPSK.

Fuente: Elaboración propia.

El receptor BPSK está comprendido por un filtro pasabajo, un filtro pasaalto, un multiplicador y un decisor. El primer filtro pasa-bajo en combinación con el filtro pasa-alto se implementa para eliminar cualquier señal que interfiera con la señal portadora a causa de la transmisión. Luego dicha señal filtrada es multiplicada por el oscilador local  $\cos(2\pi f_c t)$  que pasa a continuación por el segundo filtro pasa-bajo que separa la señal original transmitida de la señal portadora. Por último se pasa por un decisor con umbral en cero que determina qué bit fue transmitido al principio del sistema. El esquema del receptor BPSK se ilustra en la Fig. III.5.

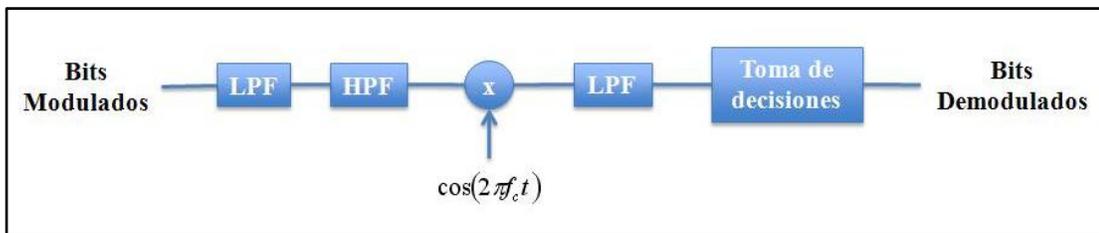


Figura III.5.- Receptor BPSK.

Fuente: Elaboración propia.

#### III.2.2.4.- Etapa 4: Modulación QPSK.

Un símbolo transmitido a través de la modulación QPSK tiene la siguiente forma:

$$s(t) = Ae^{i\omega_c t} \quad (35)$$

donde  $A = |A|e^{i\theta}$  (36)

MATLAB no permite crear un archivo *.wav* a partir de datos complejos, por lo tanto del símbolo modulado se tiene que enviar su parte real:

$$\begin{aligned}
 S_{TX} &= \text{Re}\{s(t)\} = \text{Re}\{A|e^{i\theta} e^{i2\pi f_c t}\} \\
 S_{TX} &= \text{Re}\{A(\cos\theta + i\text{sen}\theta)(\cos 2\pi f_c t + i\text{sen} 2\pi f_c t)\} \\
 S_{TX} &= \text{Re}\{A[(\cos\theta \cos 2\pi f_c t - \text{sen}\theta \text{sen} 2\pi f_c t) + i(\cos\theta \text{sen} 2\pi f_c t + \text{sen}\theta \cos 2\pi f_c t)]\}
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

De aquí el símbolo a transmitir es:

$$S_{TX} = |A|(\cos\theta \cos(2\pi f_c t) - \text{sen}\theta \text{sen}(2\pi f_c t))
 \tag{38}$$

En base a esto la función creada en MATLAB genera la modulación QPSK que viene dada por el esquema ilustrado en la Figura III.6.

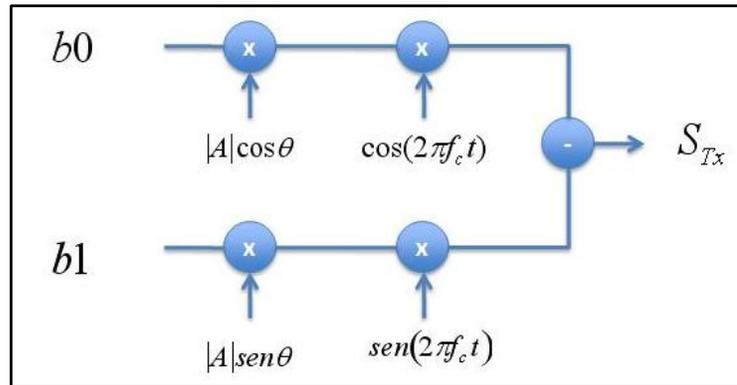


Figura III.6.- Esquema de la parte real del símbolo a transmitir en QPSK.

Fuente: Elaboración propia.

La función *MOD\_QPSK* tiene como parámetros de entrada los dos bits que conforman el símbolo a modular y arroja como salida el símbolo modulado. Dicha función se conforma por cuatro condicionales *if* que según sea la combinación de los bits, construye la señal modulada con su respectivo ángulo y amplitud. El algoritmo de esta combinación se contempla en la Tabla III.1.

Tabla III.1. Amplitud y fase correspondiente según el símbolo de entrada.

Fuente: Elaboración propia.

Símbolos		Amplitud	Fase
b0	b1		
0	0	$\sqrt{2}$	$5\pi/4$
0	1	$\sqrt{2}$	$7\pi/4$
1	0	$\sqrt{2}$	$3\pi/4$
1	1	$\sqrt{2}$	$\pi/4$

Al identificar una de las cuatro combinaciones posibles de bits, se toma el bit cero para modular la fase y el bit uno para modular la cuadratura a través de dos funciones adicionales: *bitmodc* que multiplica el bit cero por los cosenos (Figura III.7) y *bitmods* que multiplica el bit uno por los senos (Figura III.8). La salida de la función MOD\_QPSK es la resta de ambas señales.

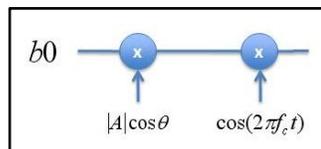


Figura III.7.- Esquema de la función *bitmodc*.

Fuente: Elaboración propia.

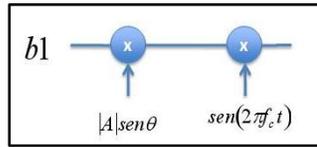


Figura III.8.- Esquema de la función *bitmods*.

Fuente: Elaboración propia.

En contraparte, el demodulador QPSK (Fig. III.9) tiene la misma estructura que el demodulador BPSK con una única diferencia en el multiplicador. El símbolo transmitido está conformado por dos bits, el multiplicador se encarga de separar los bits de fase y cuadratura a través de la multiplicación de dicho símbolo por  $\cos(2\pi f_c t)$  y  $sen(2\pi f_c t)$ , dividiendo en dos ramas el proceso final de demodulación.

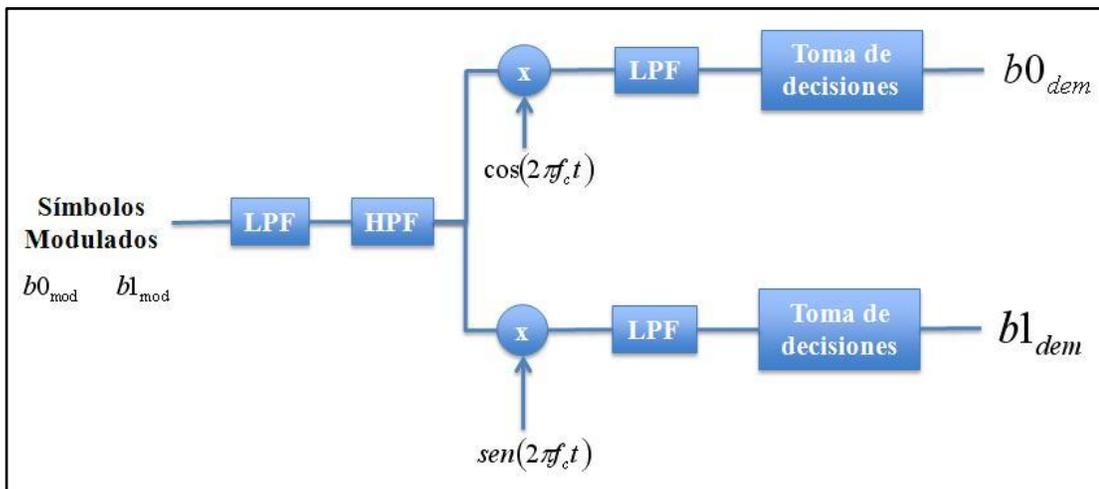


Figura III.9.-Receptor QPSK.

Fuente: Elaboración propia.

### III.2.2.5.- Etapa 5: Modulación 16QAM

La modulación 16QAM se simula en un script que genera unos bits aleatorios almacenados en un vector que es recorrido cada cuatro bits para su modulación, dos bits correspondientes a la modulación en amplitud y dos bits para la modulación en cuadratura.

La función que modula los bits aleatorios es  $gen16qam(s_1, s_2)$  donde  $s_1$  y  $s_2$  son los símbolos de entrada consecutivos que van a ser modulados. La toma de decisiones para escoger correctamente la señal de salida de la función viene dada por la variable  $a$  que convierte los datos binarios en un número entero, como se muestra en la Tabla III.2.

Tabla III.2. Codificación de los bits de entrada 16QAM.

Fuente: Elaboración propia.

$s_1$	$s_2$	$a$
00	00	0
00	01	1
00	10	2
00	11	3
01	00	4
01	01	5
01	10	6
01	11	7
10	00	8
10	01	9
10	10	10
10	11	11
11	00	12
11	01	13
11	10	14
11	11	15

Cada combinación de dos símbolos corresponde a una señal previamente guardada en el entorno de MATLAB y están basadas en señales portadoras que se

calcularon según su posición en el primer cuadrante de la constelación 16QAM mostrado en la Figura III.10.

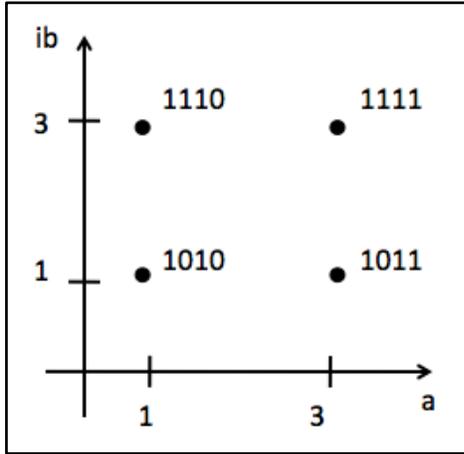


Figura III.10.- Primer cuadrante de la constelación 16QAM.

Fuente: Elaboración propia.

Las señales portadoras son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 sen1010 &= \sqrt{2}e^{i(2\pi f_c t + \phi_a)} \text{ donde } \phi_a = 45^\circ = 0.25\pi \\
 sen1011 &= \sqrt{2}e^{i(2\pi f_c t + \phi_b)} \text{ donde } \phi_b = 18.43^\circ = 0.102\pi \\
 sen1111 &= \sqrt{2}e^{i(2\pi f_c t + \phi_c)} \text{ donde } \phi_c = 45^\circ = 0.25\pi \\
 sen1110 &= \sqrt{2}e^{i(2\pi f_c t + \phi_d)} \text{ donde } \phi_d = 71.56^\circ = 0.395\pi
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

### III.2.2.6.- Proceso de Transmisión.

Seguido al proceso de diseñar las modulaciones en el entorno de MATLAB, se procedió a simular los distintos esquemas de transmisión contemplados en [3] utilizando las modulaciones BPSK y QPSK.

Para el presente Trabajo de Grado los esquemas trabajados fueron los siguientes:

1. Esquema SISO.
2. Esquema MRRC.
3. Esquema Alamouti 1.
4. Esquema Alamouti 2.

Los esquemas “Alamouti 1” y “Alamouti 2” fueron planteados por Alamouti en [3] donde definió su nuevo esquema para dos antenas transmisoras y una antena receptora (Alamouti 1) y luego lo desarrolló para dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras (Alamouti 2).

SISO (Single Input Single Output) es un sistema sin diversidad conformado por un transmisor, el canal y un receptor, como se muestra en la Fig. III.11.

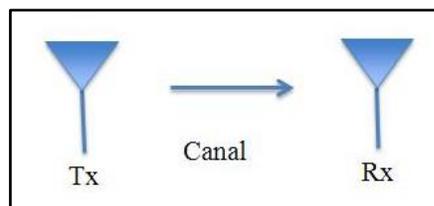


Figura III.11.- Sistema SISO.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. III.12 se muestra el Combinador de Recepción de Tasa Máxima (MRRC), sistema que cuenta con un transmisor y diversidad en la recepción, con dos receptores.

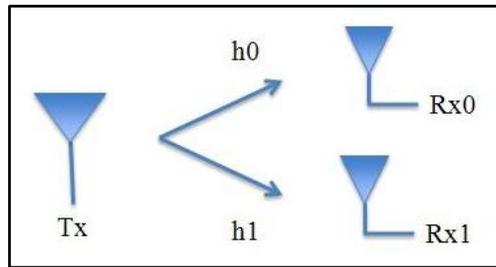


Figure III.12.- Sistema MRRC.

Fuente: Elaboración propia.

El esquema Alamouti 1 presenta diversidad en la transmisión con dos antenas transmisoras pero con una sola receptora, mientras que el esquema Alamouti 2 presenta la mayor diversidad entre todos los sistemas, porque cuenta con dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras. Las Fig. III.13 y Fig. III.14 ilustran ambos esquemas.

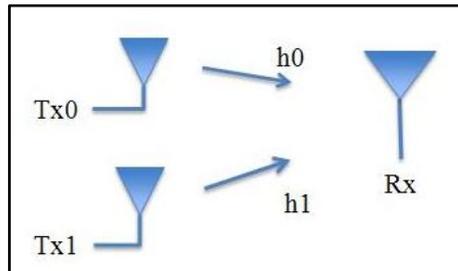


Figura III.13.- Sistema Alamouti 1.

Fuente: Elaboración propia.

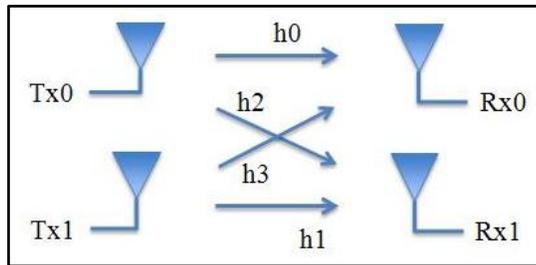


Figura III.14.- Sistema Alamouti 2.

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de transmisión se desarrolló basándose en el número de antenas transmisoras en cada esquema. Para SISO y MRRC se utilizan las funciones *untxbpsk* y *untxqpsk* al estar compuestos por una antena transmisora. Éstas son funciones que están comprendidas por el modulador a utilizar, tienen como parámetro de entrada los datos aleatorios a modular y arrojan como resultado los datos modulados en forma de un vector fila que posteriormente serán procesados por el receptor.

Para Alamouti 1 y Alamouti 2 las funciones transmisoras son *dosbpsk* y *dosqpsk*. Poseen como parámetro de entrada los datos no modulados y arrojan como salida dos vectores fila que representan los datos modulados a enviar en el tiempo  $t$  y en el tiempo  $t+T$ .

De acuerdo con el esquema de Alamouti cada antena transmisora envía un símbolo distinto en dos intervalos de tiempo, en el tiempo  $t$  se envía  $s_0$  por la antena transmisora cero ( $Tx_0$ ) y  $s_1$  por la antena transmisora uno ( $Tx_1$ ), y en el tiempo  $t+T$  se envía  $-s_1^*$  por la antena  $Tx_0$  y  $s_0^*$  por la antena  $Tx_1$ . En la simulación se procedió como primer paso a modular todos los datos (Fig. III.15) para luego conjugar y reagrupar los símbolos de acuerdo al orden con que serán transmitidos por cada antena (Fig. III.16).

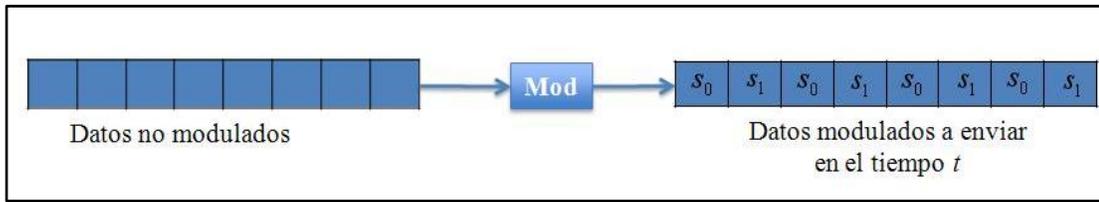


Figura III.15.- Datos a enviar en el tiempo  $t$ .

Fuente: Elaboración propia.



Figura III.16.- Datos a enviar en el tiempo  $t+T$ .

Fuente: Elaboración propia.

### III.2.2.7.- Proceso de Recepción.

En los cuatro esquemas trabajados el receptor es un proceso general que va desde la definición del canal hasta la toma de decisiones a partir de los datos modulados y los datos estimados. La Fig. III.17 muestra dicho proceso.

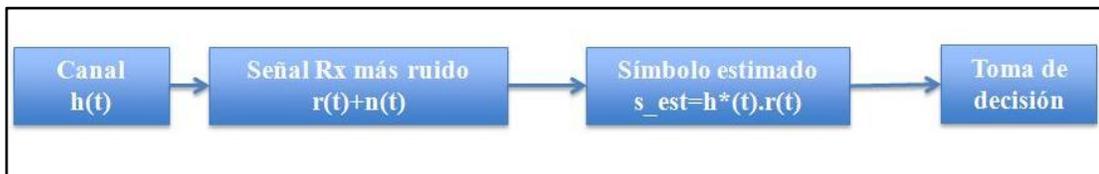


Figura III.17.- Receptor de los sistemas.

Fuente: Elaboración propia.

En MATLAB el receptor es una función a la que le entran los datos transmitidos, los símbolos o bits modulados y el valor de la desviación estándar del ruido. Se comprende por un ciclo que recorre todos los datos modulados (símbolo a símbolo) en el que se define: el canal, las señales recibidas con ruido y el símbolo estimado, concluyendo con la toma de decisión sobre el símbolo que fue enviado.

Para cada esquema las variaciones en la recepción se presentan en el número de canales, el número de señales recibidas y en la forma en que se definen los símbolos estimados. A lo largo del desarrollo se presentan dichas variaciones para cada uno de los esquemas trabajados.

El canal se define como un número complejo con respuestas en fase y amplitud que representa los efectos de transmisión y recepción:

$$h_o = \alpha_o e^{i\theta_o} \quad (40)$$

donde  $\alpha_o$  es la atenuación del canal

$\theta_o$  es la respuesta en fase.

En la Tabla III.3 se muestra la definición de los canales de acuerdo a cada esquema.

Tabla III.3.- Canales según esquemas.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Esquema</b>	<b>Canales</b>
SISO	$h_o = \alpha_o e^{i\theta_o}$

MRRC	$h_0 = \alpha_0 e^{i\theta_0}$ $h_1 = \alpha_1 e^{i\theta_1}$
Alamouti 1	$h_0 = \alpha_0 e^{i\theta_0}$ $h_1 = \alpha_1 e^{i\theta_1}$
Alamouti 2	$h_0 = \alpha_0 e^{i\theta_0}$ $h_1 = \alpha_1 e^{i\theta_1}$ $h_2 = \alpha_2 e^{i\theta_2}$ $h_3 = \alpha_3 e^{i\theta_3}$

La señal recibida también se define en el receptor, de la siguiente forma:

$$r_o = h_o s_o \quad (41)$$

con  $s_o$  como el símbolo que se transmitió. Seguidamente se le adiciona ruido blanco Gausseano con media cero y con desviación estándar es el valor indicado como parámetro de entrada de la función. En MATLAB la función *randn* describe el ruido blanco Gausseano con media cero y desviación estándar uno. Para cambiar el valor de la desviación estándar se procede a multiplicar el cuadrado del valor deseado, a la función *randn*:

$$\text{sqrt}(\text{des\_est})\text{randn}(x)$$

Por lo tanto la señal recibida con ruido es de la forma:

$$r_o = h_o s_o + \text{sqrt}(\text{des\_est})\text{randn}(x)$$

Cada esquema posee distintas señales recibidas, que se muestran en la Tabla III.4.

Tabla III.4.- Señales recibidas según esquemas.

Fuente: Elaboración propia.

Esquemas	Señales Rx más ruido
SISO	$r_0 = h_0 s_0 + n_0$
MRRC	$r_0 = h_0 s_0 + n_0$ $r_1 = h_1 s_1 + n_1$
Alamouti 1	$r_0 = h_0 s_0 + n_0$ $r_1 = h_1 s_1 + n_1$
Alamouti 2	$r_2 = h_2 s_2 + n_2$ $r_3 = h_3 s_3 + n_3$

Con el canal y la señal recibida correctamente definidos, se procede a determinar el símbolo estimado como la multiplicación de ambos valores. Esta multiplicación es basada en el algoritmo MRRC con dos antenas receptoras definida como:

$$\tilde{s}_o = h_o^* r_o + h_1^* r_1 \quad (42)$$

con  $h_o^*$  y  $h_1^*$  como el conjugado de  $h_o$  y  $h_1$ , respectivamente.

Para el sistema SISO, el símbolo estimado es:

$$\tilde{s}_o = h_o^* r_o \quad (43)$$

De acuerdo a Alamouti en [3], para el esquema con dos antenas transmisoras y una antena receptora los símbolos estimados se definen como:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1^* r_1 \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0^* r_1 \end{aligned} \quad (44)$$

Y para el esquema con dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras, los símbolos estimados se reducen a:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1^* r_1 + h_2^* r_2 + h_3^* r_3 \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0^* r_1 + h_3^* r_2 - h_2^* r_3 \end{aligned} \quad (45)$$

Como paso final en la recepción, se realiza la toma de decisiones generada a partir de la siguiente desigualdad:

$$d^2(\tilde{s}_o, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_o, s_k) \quad \forall i \neq k \quad (46)$$

donde  $d^2(\tilde{s}_o, s_i)$  es la distancia Euclideana cuadrada, definida en [3] como:

$$d^2(x, y) = (x - y)(x^* - y^*) \quad (47)$$

con  $s_i$  y  $s_k$  son los símbolos modulados sin ruido y sin transmisión, por lo tanto el receptor debe tener conocimiento de dichos símbolos. Para ello en BPSK el receptor conoce la forma modulada del bit cero y del bit uno (Tabla III.5) y en QPSK conoce la forma modulada de cada símbolo (Tabla III.6).

Tabla III.5.- Forma modulada de los bits BPSK.

Fuente: Elaboración propia.

Bit	Forma Modulada
0	$1 \cdot \cos(2\pi f_c t)$
1	$-1 \cdot \cos(2\pi f_c t)$

Tabla III.6.- Forma modulada de los símbolos QPSK.

Fuente: Elaboración propia.

Símbolos	Forma Modulada
00	$ \sqrt{2}  \left( \cos\left(\frac{5\pi}{2}\right) \cos(2\pi f_c t) - \text{sen}\left(\frac{5\pi}{2}\right) \text{sen}(2\pi f_c t) \right)$
01	$ \sqrt{2}  \left( \cos\left(\frac{7\pi}{2}\right) \cos(2\pi f_c t) - \text{sen}\left(\frac{7\pi}{2}\right) \text{sen}(2\pi f_c t) \right)$
10	$ \sqrt{2}  \left( \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) \cos(2\pi f_c t) - \text{sen}\left(\frac{3\pi}{2}\right) \text{sen}(2\pi f_c t) \right)$
11	$ \sqrt{2}  \left( \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos(2\pi f_c t) - \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \text{sen}(2\pi f_c t) \right)$

En las funciones de MATLAB la lógica de comparación de las distancias es la misma tanto para la modulación BPSK como para la modulación QPSK, con la única variación en el número de distancias a calcular (para BPSK son dos distancias mientras que para QPSK son cuatro). Se inicia tomando el máximo valor de cada distancia y luego se busca el mínimo, que representa la cercanía entre el símbolo estimado y el símbolo modulado y a partir de allí determinar exactamente cuál fue el símbolo transmitido.

### **III.2.3.- Fase III: Pruebas y Optimización del Proyecto.**

En la presente fase del Trabajo de Grado se implementan los distintos sistemas para recopilar los resultados y posteriormente analizarlos. Es importante destacar que todas las pruebas con los micrófonos y cornetas se realizaron “off line”, es decir, el procesamiento de los bits en la transmisión y en la recepción se llevó a cabo antes y después que se enviaran por el canal.

#### III.2.3.1.- Prueba 1: Verificación de transmisión y recepción.

A continuación de establecer los distintos esquemas en el entorno de MATLAB se procedió a verificar el correcto funcionamiento entre transmisor y receptor a través del envío de datos conocidos y la variación de distintos parámetros que afectan el sistema.

En el transmisor se variaron los datos a enviar y se comprobó que en el receptor, después del procesamiento correspondiente a cada esquema, los bits recibidos eran los mismos que se enviaron.

Por otro lado, en el receptor la variación se dio a través de la descripción del canal  $h(t)$  para observar cómo era el comportamiento del esquema frente a todas las posibles condiciones de un canal. Las pruebas de verificación se hicieron para dos escenarios distintos: el primero con  $h(t)$  definido como un valor específico de

amplitud y fase, y el segundo con  $h(t)$  descrito como un valor aleatorio, igualmente en amplitud y fase.

### III.2.3.2.- Prueba 2: Curva de Probabilidad de Error.

Una vez establecidos y verificados los esquemas, se procede a implementarlos mediante una simulación en MATLAB para graficar la curva de probabilidad de error (BER) en función de la relación señal a ruido (SNR), mediante la cual se demuestra que el nuevo esquema planteado por Alamouti es en efecto el más robusto y eficaz. La curva se elabora para cada esquema y con los dos tipos de modulaciones para establecer una comparación probabilística de su comportamiento.

Al trabajar con la probabilidad de error es importante efectuar un número alto de pruebas para un mismo valor de  $E_b/N_o$  de manera que el resultado sea estadísticamente correcto, debido a esto el proceso de transmisión y recepción de bits aleatorios se realiza 100 veces y se acumula la probabilidad de error por bit cada vez, para luego calcular el valor promedio con que se construye la curva BER vs.  $E_b/N_o$ .

La función *recorrido* es la que se encarga del proceso de transmisión y recepción de los esquemas. Está comprendida por un ciclo que genera 1000 bits aleatorios que entran al transmisor y son modulados para luego pasar por el receptor, procesarlos y arrojar los bits demodulados.

Conociendo los bits que se transmiten y los bits demodulados, se comparan y se cuenta la cantidad de errores que se generaron durante el proceso. Dichos errores se dividen entre el número total de bits, calculando así la probabilidad de error por bit:

$$P_e = \frac{\text{nro bits errado}}{\text{nro bits tx}} \quad (48)$$

La relación señal a ruido se describe como:

$$\frac{E_b}{N_o} \quad (49)$$

donde  $E_b$  es la energía de bit descrita como la potencia de la señal por el tiempo de bits; y  $N_o$  es la energía de ruido definida como la división entre la potencia de ruido y el ancho de banda del sistema. Para poder precisar el rango valores de la relación señal a ruido se analizaron sus parámetros de dependencia: potencia de la señal, tiempo de bit, potencia de ruido y ancho de banda. El tiempo de bit y ancho de banda son valores establecidos al inicio del Trabajo de Grado por lo que variarlos para poder obtener valores de la curva implica un cambio en todos los procesos anteriores. La potencia de la señal depende directamente de la amplitud, pero no es un factor que implique una variación considerable dentro del sistema; por lo tanto el parámetro a cambiar es la potencia de ruido dada por la desviación estándar.

Para la simulación el script *MAIN* se encarga de calcular los valores para la desviación estándar y promediar los valores de BER que arroja la función *recorrido*. Con ambos vectores se construye una gráfica semilogarítmica para cada modulación con todos los esquemas.

### III.2.3.3.- Implementación.

Como último procedimiento de la Fase III se ejecutó la implementación de cada uno de los cuatro esquemas de transmisión y recepción a través de cornetas y micrófonos como hardware requerido en los sistemas acústicos.

La transmisión de los sistemas vino dada por un script en MATLAB en el que se generaba y se procesaba los bits aleatorios a transmitir. En la Figura III.18 se muestra un diagrama completo de dicho transmisor.

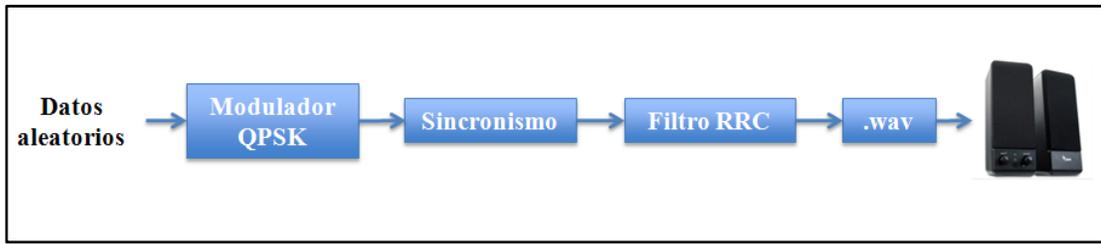


Figura III.18.- Diagrama del transmisor implementado.

Fuente: Elaboración propia.

El transmisor consta de tres bloques importantes: el modulados QPSK, el sincronismo y el filtro adaptado Raíz de Coseno Alzado (RRC). El modulador QPSK consiste en una función que asigna a cada símbolo de entrada su valor correspondiente en la coordenada real e imaginaria de la constelación (Figura III.19).

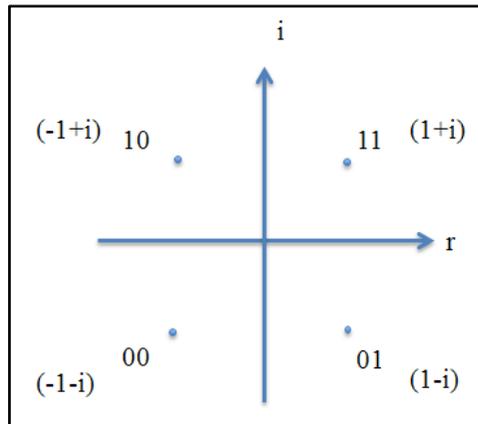


Figura III.19.- Constelación QPSK y sus coordenadas.

Fuente: Elaboración propia.

El sincronismo está conformado por un vector de cuatro símbolos conocidos, que son modulados de igual manera que se hace con los datos aleatorios de entrada. Una vez modulados los símbolos de sincronismo, éstos son adheridos delante de los

datos modulados a manera de ejecutar una efectiva detección de los datos por parte del receptor.

Como último bloque de transmisor, está el filtro adaptado Raíz de Coseno Alzado. El filtro adaptado tiene una importante función dentro de los sistemas de comunicaciones inalámbricos debido a que su respuesta al impulso es adaptada a la señal que se transmite, por lo tanto genera que la señal sea inmune a la Interferencia Intersimbólica (ISI) que se ocasiona en el canal.

El filtro adaptado aplicado genera muestras de un pulso Raíz de Coseno Alzado, dadas por:

$$s = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{\text{sen}((1-\beta)\pi t_n) + 4\beta t_n \cos((1+\beta)\pi t_n)}{\pi t_n (1-16(\beta t_n)^2)} \quad (50)$$

donde:  $M$  es el factor de sobremuestreo, que indica la cantidad de muestras por período de símbolo.

$\beta$  es el factor de caída del filtro.

$t_n$  es el instante de muestreo definido como:  $t_n = (-P.M:P.M)/M$  con  $P$  como la semiduración del pulso, en símbolos.

Previo a aplicar el filtro adaptado, se toma el vector que contiene el sincronismo y los datos modulados y se muestrea de acuerdo al factor de sobremuestreo  $M$ . Este nuevo vector es la entrada del filtro que arroja los símbolos en fase (I) y cuadratura (Q) para conformar el símbolo a transmitir de la forma:

$$S_{TX} = S_I \cos 2\pi f_c t - S_Q \text{sen} 2\pi f_c t \quad (51)$$

Una vez que se obtiene el símbolo completo, se procede a generar un archivo .wav y así transmitirlo a través de las cornetas.

En el otro extremo del canal de comunicación se implementó el receptor, ilustrado en la Figura III.20.

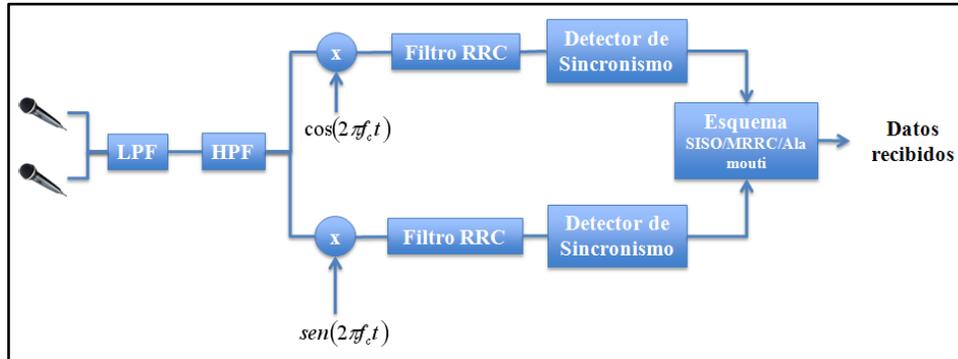


Figura III.20.- Diagrama del receptor implementado.

Fuente: Elaboración propia.

La señal recibida mediante los micrófonos es traspasada por dos filtros: un pasabajo y un pasaalto que se encargan de filtrar la señal de ruidos e interferencias que se encuentren fuera de la frecuencia de la señal portadora.

Con la señal debidamente filtrada se procede a demodularla, multiplicando por la señal osciladora y así separar los datos recibidos en sus componentes I y Q, los cuales pasan por el filtro adaptado para recuperar la señal original transmitida.

El detector de sincronismo es la función *Ident\_Sinc* diseñada en MATLAB que se encarga de encontrar los símbolos de sincronismo que se adhirieron a los datos modulados en la transmisión. Como parámetro de entrada se tienen los datos I y Q equivalentes a los símbolos de sincronismo recibidos a través del micrófono y los datos I y Q de los símbolos de sincronismo conocidos, generados en el transmisor. El proceso que se realiza es la correlación entre los símbolos recibidos y los símbolos conocidos, cuyo máximo valor indicará que la comparación obtuvo su mejor parecido. El parámetro de salida de la función es la primera posición de los datos transmitidos.

Dichos datos sin sincronismo son introducidos en la función que procesa la entrada según sea el esquema. Es importante destacar que éstas funciones consisten del mismo algoritmo usado en las pruebas de simulación, con la única excepción que el canal implementado fue el que arrojó el estudio de la respuesta del canal en la Fase I del Trabajo de Grado.

Al implementar cada sistema se procedió a transmitir y recibir 20 veces distintos datos aleatorios. De igual forma en cómo se hizo en la simulación, se calculó la probabilidad de error y se fue acumulando a medida que se realizaba el proceso de transmitir y recibir, y al culminar se calculó un valor promedio de BER para cada sistema.

## Capítulo IV – Análisis de Resultados

### IV.1.- Resultados 1: Respuesta del Canal.

Para el estudio de la respuesta del canal se ejecutaron cuatro pruebas con los correspondientes transmisores y receptores de cada esquema detallado a lo largo del Trabajo de Grado:

- SISO con una corneta y un micrófono.
- MRRC con una corneta y dos micrófonos.
- Alamouti 1 con dos cornetas y un micrófono.
- Alamouti 2 con dos cornetas y dos micrófonos.

La principal característica a observar con los gráficos arrojados por las pruebas, era el comportamiento del canal entre el transmisor y receptor en un amplio rango de frecuencias. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras IV.1, IV.2, IV.3 y IV.4.

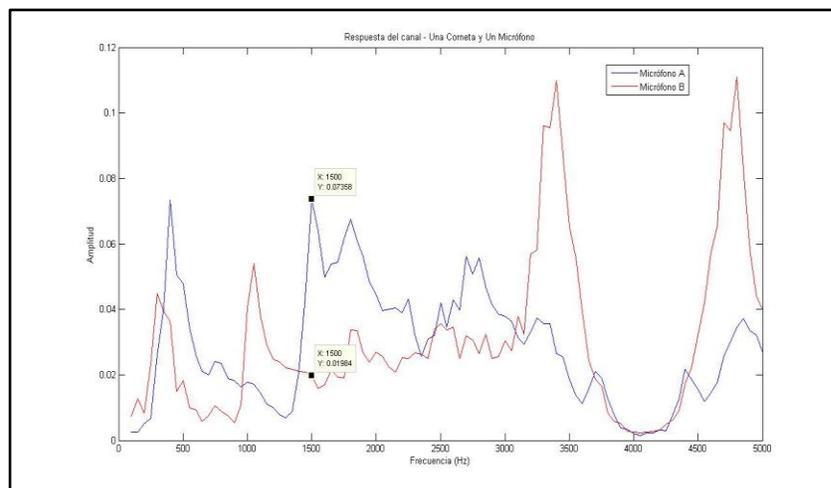


Figura IV.1.- Respuesta del Canal – Una corneta y un micrófono.

Fuente: Elaboración propia.

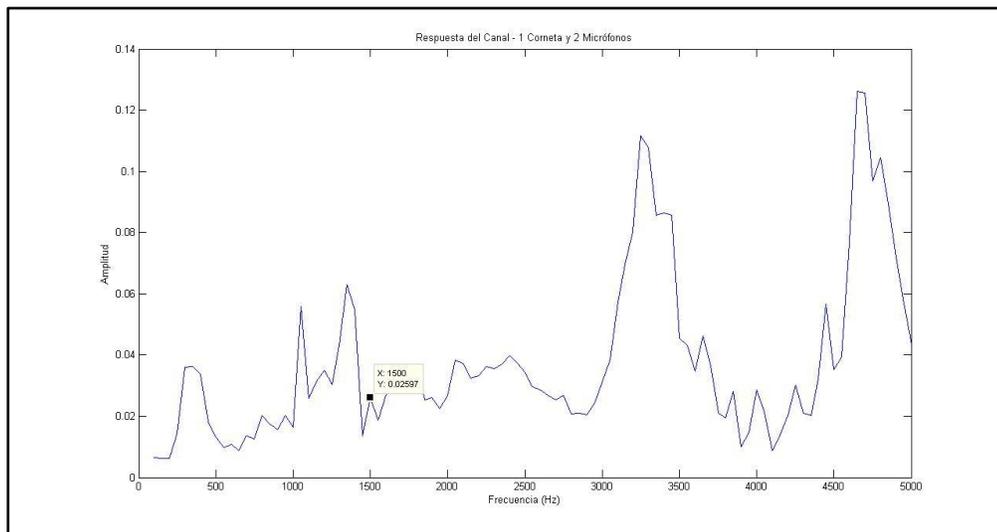


Figura IV.2.- Respuesta del Canal – Una corneta y dos micrófonos.

Fuente: Elaboración propia.

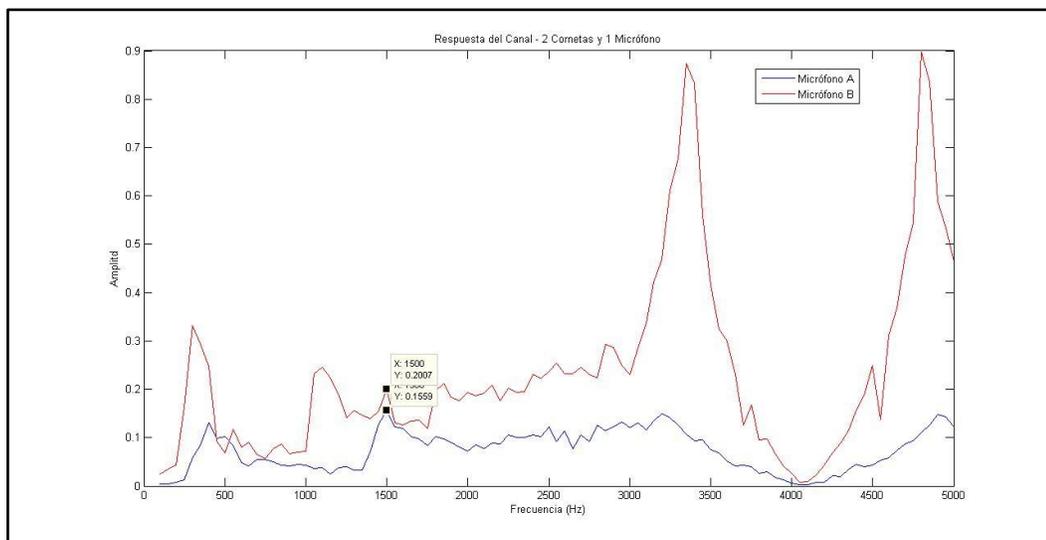


Figura IV.3.- Respuesta del Canal – Dos cornetas y un micrófono.

Fuente: Elaboración propia.

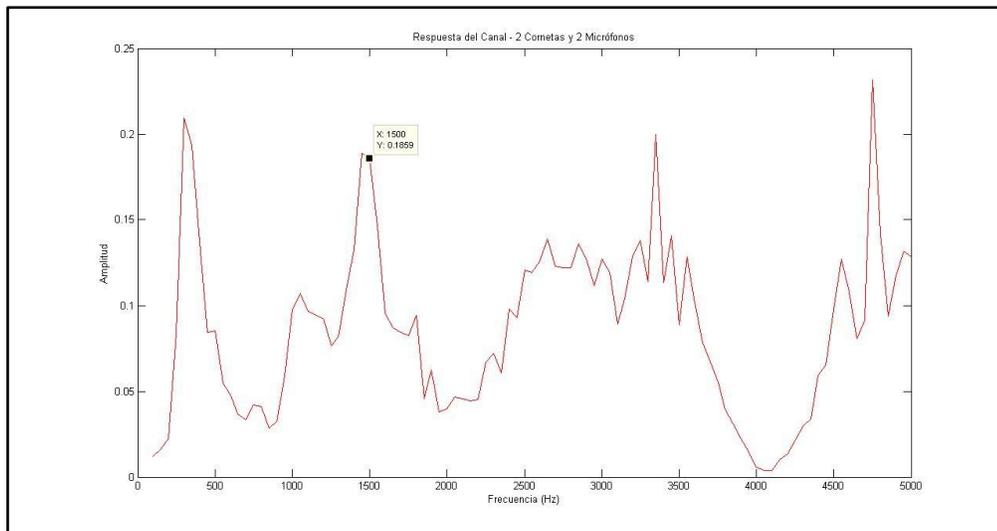


Figura IV.4.- Respuesta del Canal – Dos cornetas y dos micrófonos.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las cuatro gráficas se estableció que para la implementación se debía utilizar como frecuencia de la señal portadora el valor de 1500Hz ya que alrededor de ese valor de frecuencia, la amplitud se muestra como un promedio de todos los valores que puede tomar.

La Figura IV.1 muestra la respuesta del canal para la combinación entre una corneta y el micrófono A (línea azul) y para la combinación de una corneta y el micrófono B (línea roja). Al analizar se puede observar que con la utilización del micrófono A se obtiene una mayor atenuación del canal en comparación con el micrófono B. Por otra parte, la Figura IV.2 presenta la gráfica de amplitud en función de la frecuencia, para la implementación de una corneta y dos micrófonos. A pesar de que para el valor de frecuencia de 1500Hz la amplitud es de 0.02, valor muy bajo, éste fue el utilizado en el algoritmo de recepción de MRRC como la descripción del canal  $h(t)$ .

En la Figura IV.3 se ilustra la respuesta del canal para el esquema Alamouti 1, con dos cornetas como transmisores y un micrófono como receptor. A diferencia de la

Fig. IV.1, aquí se observó cómo el micrófono B tiene una mayor respuesta en amplitud que el micrófono A, indicando que tiene un mejor comportamiento captando un sonido proveniente de dos cornetas. Finalmente se analizó la Figura IV.4 observándose que la respuesta del canal para Alamouti 2 tiene los valores más altos en amplitud que en comparación con los esquemas anteriores.

Se debe destacar que para el esquema de Alamouti 2 se requería cuatro valores distintos que describieran el canal en el algoritmo, por ello se escogieron otros tres valores de atenuación derivados de las gráficas anteriores.

#### IV.2.- Resultados 2: Curva BER vs. $E_b/N_o$ .

La simulación ejecutada con los cuatro esquemas con modulación BPSK y QSPK arrojó la curva de probabilidad de error en función de la relación señal a ruido como herramienta de comparación entre los esquemas. Las Figuras IV.5 y IV.6 exponen dichas curvas.

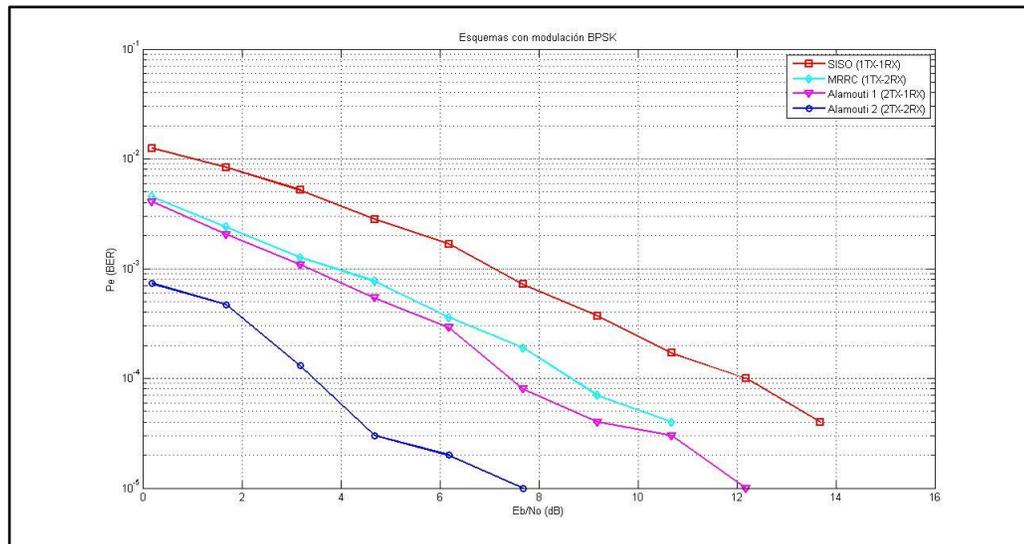


Figura IV.5.- Curva BER vs.  $E_b/N_o$  para modulación BPSK.

Fuente: Elaboración propia.

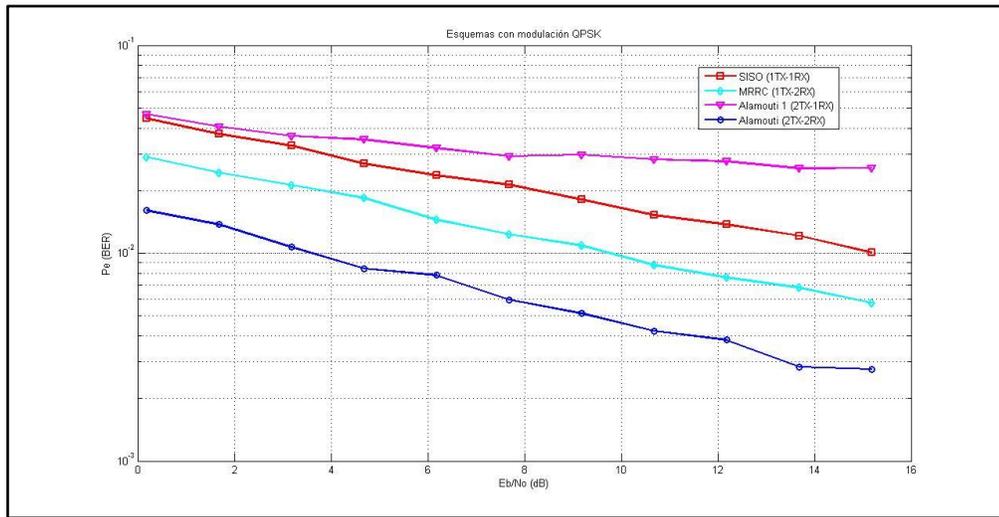


Figura IV.6.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación QPSK.

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis detallado de la curva con modulación BPSK se observa lo siguiente:

- El esquema SISO posee la curva de probabilidad más ancha, indicando que al no haber diversidad en ninguno de los extremos del sistema, su comportamiento es probabilísticamente deficiente.
- Los esquemas MRRC y Alamouti 1, se comportan de manera más eficaz que el esquema SISO debido a la presencia de diversidad; destacando que la diversidad en transmisión es mucho más eficiente que la diversidad en recepción.
- La curva de probabilidad del esquema Alamouti 2 describe el comportamiento más eficiente de los cuatro esquemas estudiados. Con el resultado de esta curva se verifica que el esquema planteado por

Alamouti en [3], que implementa diversidad en transmisión y en recepción, es el más efectivo.

En las Figuras IV.7 y IV.8 se detallan puntos de comparación entre las curvas en dos valores distintos de  $E_b/N_0$ : 1,6dB y 3,178dB.

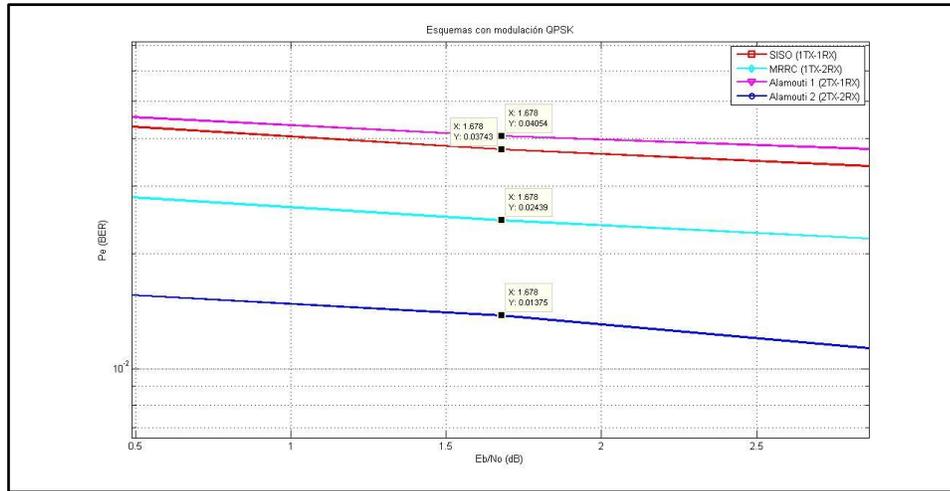


Figura IV.7.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación BPSK para  $E_b/N_0 = 1,6$ dB.

Fuente: Elaboración propia.

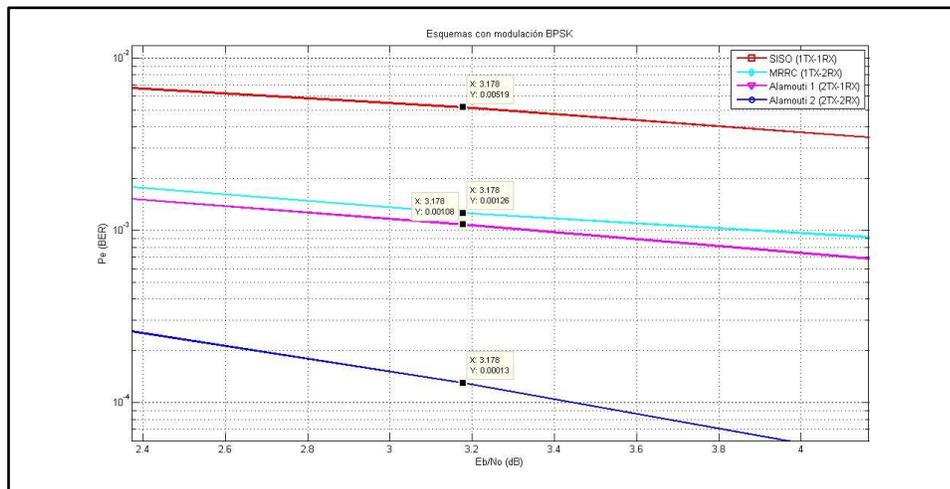


Figura IV.8.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación BPSK para  $E_b/N_0 = 3,178$ dB.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. IV.7 para el esquema SISO la probabilidad de error es de  $8,38 \times 10^{-3}$  mientras que para Alamouti 2 la probabilidad es de  $4,7 \times 10^{-4}$ . Análogamente en la Fig. IV.8 la probabilidad para SISO es  $5,19 \times 10^{-3}$  y para Alamouti 2 es  $1,3 \times 10^{-4}$ , comparando estos valores se nota que para la diferencia de aproximadamente 2dB en la relación Señal a Ruido, la probabilidad de error decae en mayor proporción para el esquema de Alamouti 2 a diferencia de los demás esquemas. Y es de notar que los valores para MRRC y Alamouti 1 en ambos casos de 1,6dB y 3,178dB sus valores son muy cercanos y decaen con igual relación.

Continuando el análisis de las curvas, la Figura IV.6 muestra los esquemas estudiados con modulación QPSK, y resaltan las siguientes observaciones:

- El esquema de Alamouti 1 se presenta como el más deficiente, lo cual es un resultado inusual luego del estudio y el conocimiento de cómo es su comportamiento.
- Alamouti 2, como era de esperarse resultó el de mejor comportamiento de probabilidad de error y más eficiente de los esquemas.
- El rango de la probabilidad de error en esta curva es mayor en comparación con la curva de modulación BPSK. Consecuencia derivada del hecho que la modulación cuenta con más símbolos por lo tanto en la toma de decisiones en el receptor aumenta la probabilidad de error al discernir entre un símbolo y otro.

Al examinar las curvas con más detalle en los valores específicos de  $E_b/N_o$ : 1,678dB y 3,178dB, se compara los valores de probabilidad de error en los cuatro esquemas. La Figura IV.9 ilustra las curvas para 1,678dB observándose que SISO tiene una probabilidad de  $3,743 \times 10^{-2}$  y Alamouti 2 de  $1,375 \times 10^{-2}$  y la Figura IV.10 indica que SISO posee una probabilidad de  $3,294 \times 10^{-2}$  mientras que para el esquema

de Alamouti 2 es de  $1,071 \times 10^{-2}$ . Detallando los valores se advierte que el decaimiento de la probabilidad en los cuatro casos es de menor proporción a lo largo de la diferencia de 2dB que se presenta.

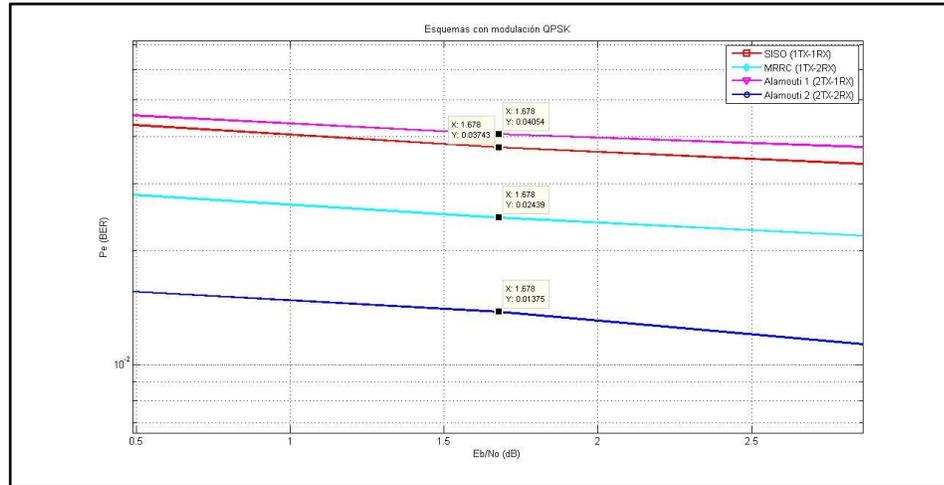


Figura IV.9.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación QPSK para  $E_b/N_0 = 1,678$ dB.

Fuente: Elaboración propia.

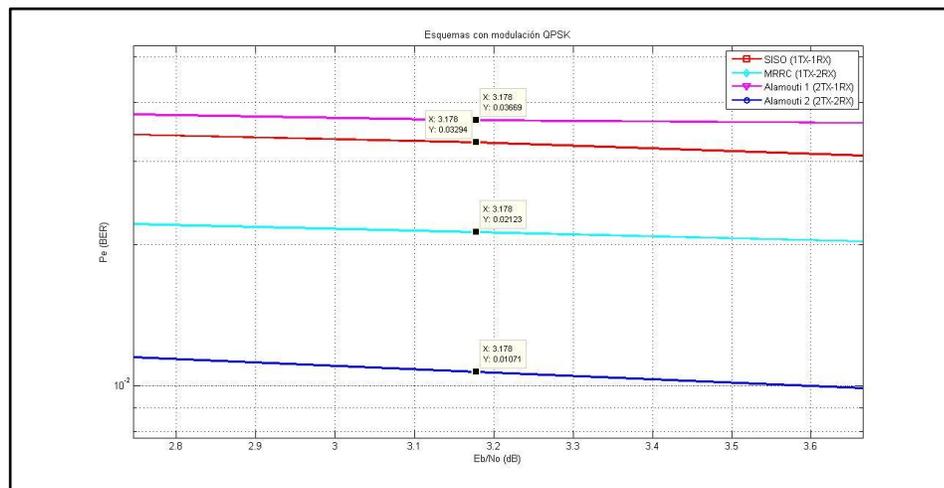


Figura IV.10.- Curva BER vs.  $E_b/N_0$  para modulación QPSK para  $E_b/N_0 = 3,178$ dB.

Fuente: Elaboración propia.

### IV.3.- Resultados 3: Implementación.

La implementación de cada sistema de comunicación en un ambiente acústico se llevó a cabo para verificar que el esquema planteado por Alamouti, que establece la diversidad en transmisión y recepción como un sistema más robusto y eficaz, es aplicable para un escenario distinto al de las antenas.

Para sostener este argumento se calculó la probabilidad de error promedio de cada sistema arrojando como resultado los valores expuestos en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1.- Probabilidad de error promedio por esquema.

	<b>Esquemas</b>			
<b><math>P_e</math></b>	<b>SISO</b>	<b>MRRC</b>	<b>Alamouti 1</b>	<b>Alamouti 2</b>
	0,5019	0,5	0,4992	0,4971

De estos resultados se analizan los siguientes puntos:

- Los valores promedio de la probabilidad de error son altos. Esto puede ser consecuencia de varios factores que influyen en la implementación, como: el ambiente de trabajo en donde se realizaron las pruebas, el ruido y las interferencias naturales del canal y el adicionado por el hardware utilizado mencionando específicamente: los micrófonos, como se ilustra en las distintas gráficas arrojadas por el estudio de la respuesta del canal, estos tienen un comportamiento muy distinto para cada esquema.

- Igualmente al analizar los valores se nota que a pesar de que el sistema Alamouti 2 muestra una mejora con respecto a los demás esquemas, la diferencia entre ellos no es grande. La causa más probable de este fenómeno es el hecho de que la estimación del canal usada en el algoritmo de cada esquema fue sólo descrita por la amplitud. A diferencia de la simulación, el canal estaba descrito en amplitud y fase para al momento de implementar, la medición del canal en fase era un estudio complejo y fuera de los alcances del Trabajo de Grado.
- Al igual que los resultados arrojados por la simulación, el esquema Alamouti 2 es el más efectivo con una probabilidad de error menor de los cuatro esquemas, comprobando que la diversidad en transmisión y recepción mejora el sistema de comunicaciones.

Los presentes resultados verifican la efectividad del uso de múltiples transmisores y múltiples receptores, ofreciendo robustez al sistema. También se afirma e innova en que MIMO es aplicable en un canal acústico donde el desvanecimiento multitrayecto, el ruido y las interferencias son factores predominantes del sistema y que pueden afectar en alto nivel la comunicación.

## Capítulo V - Conclusiones y Recomendaciones

### V.1.- Conclusiones.

A partir del análisis de resultados arrojado por la investigación se comprobó que el sistema MIMO es perfectamente aplicable en el sistema acústico. La implementación llevada a cabo arrojó un estudio en la probabilidad de error en el que se compararon distintos esquemas de transmisión y recepción (sin diversidad, con diversidad en transmisión, con diversidad en recepción y con diversidad en transmisión y recepción) verificando la mejora que representa implementar múltiples entradas y múltiples salidas dentro del sistema de comunicación.

De igual manera se verificó mediante una simulación de los esquemas anteriormente mencionados que el esquema expuesto por Alamouti era eficaz y robusto para sistemas donde el desvanecimiento, el ruido y la interferencia afectan la comunicación. Esta verificación se sustentó con la realización de la curva de probabilidad de error en función de la relación señal a ruido para las modulaciones BPSK y QPSK, y del análisis del comportamiento de las curvas se determinó que la diversidad en transmisión y en recepción mejora la probabilidad de error por bit en un sistema, sin necesidad de sacrificar ancho de banda ni potencia de la señal.

Todo sistema de transmisión y recepción debe ser capaz de recuperar la trama que se está enviando a través de una señal de reloj. Al trabajar en un sistema acústico, no se contó con esta señal por lo que se tuvo que diseñar un detector de sincronismo en el receptor que fuera capaz de detectar los símbolos de sincronismo concatenados en el transmisor y así poder recuperar los datos enviados.

## **V.2.- Recomendaciones.**

Como resultado de la simulación e implementación que se desarrolló en este Trabajo de Grado se presentan las siguientes recomendaciones:

- Para optimizar la implementación se recomienda hacer la medición completa del canal, por lo tanto el estudio de la respuesta del canal debe incluir su comportamiento en fase.
- Se sugiere la optimización del hardware bajo la realización de pruebas con micrófonos iguales y, de ser posible, en una cámara antieco.
- Debido a que MATLAB es un lenguaje interpretado sobre una máquina virtual no permite realizar una transmisión en tiempo real, por ello se recomienda que las rutinas diseñadas en MATLAB sean colocadas en una librería de enlace dinámico (DLL) y así poder utilizarlas y compilarlas en una aplicación en tiempo real de máquina.

## Bibliografía

- [1] D. Sánchez, “Estudio de dualidad transmisión-recepción en sistemas MIMO multiusuario”, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- [2] O. Fernández, “Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN”, Ph. D. Tesis, Universidad de Cantabria, Santander, España, Mayo 2007.
- [3] S. M. Alamouti, “A simple transmit Diversity technique for wireless communications”, in *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, 1998, pp. 1451-1458.
- [4] N. Hernández, “Diseño de proyecto técnico para solución de acceso masivo en la zona metropolitana utilizando la tecnología WiMAX”, Tesis, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Miranda, Venezuela, 2007.
- [5] S. Haykin. *Communication System*. Ed. Jhon Wiley & Son, 2001.
- [6] Modulación Digital, Sistema de Telecomunicación. [En línea]. Disponible en: <http://aulaweb.uca.edu.ni/blogs/milciades/files/2010/09/Trasmdigital.pdf>.
- [7] Modulación Digital. [En línea]. Disponible en: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/hjeslavab/Downloads/Modulacion%20Digital.pdf>.
- [8] T. Adrián. “Modulación Multisímbolo”. Guía de Estudio.
- [9] A. B. Carlson. *Communication System*. 4th Ed. New York: McGraw Hill, 2002
- [10] G. Tsoulos. *MIMO System Technology for Wireless Communications*. Florida: Taylor & Francis Group, 2006.

[11] C. V. Vargas, W. E. López y C. F. Da Rocha. “Sistema de comunicación inalámbrica MIMO-OFDM”, Acta Nova, vol 3, pp. 761-777. Junio 2007.

[12] Trabajos académicos de la Escuela de Ingenieros de Sevilla, Universidad de Sevilla, “Sistemas de diversidad en transmisión. Estudio y simulación en MATLAB del esquema de Alamouti”.

## **Anexos**

### **Anexo I.- Especificaciones Técnicas de conectores y puertos de Macbook 13”.**



## **Anexo II.- Especificaciones Técnicas del adaptador USB-Audio.**

Dispositivo que procesa la señal de audio realizando las funciones de una tarjeta de audio como entrada de sonido por medio de un micrófono.

Compuesto por un circuito integrado que se encarga de procesar el sonido, liberando al microprocesador de esta actividad. También integran una memoria RAM denominada “buffer” que almacena datos, para que no se produzcan interrupciones en el sonido durante otras actividades internas.

Dispositivo que no necesita instalación de controladores para su uso. “Plug & Play”. Se alimenta desde el puerto USB de la computadora.

## **Anexo III.- Especificaciones Técnicas del Sistema de audio.**

### **Cornetas**



### **Micrófonos**

- Micrófono TDM-220 Tech Microphone. [Micrófono A]

Cápsula con imán de neodymium.

Conector cannon XLR-3, salida balanceada.

Cable de micrófono OFC.

Especificaciones:

- Tipo: Dinámico.
- Dirección: Unidireccional.
- Frecuencia: 70Hz-15kHz.
- Impedancia de salida:  $600\Omega \pm 15\%$ .
- Sensibilidad  $-75\text{dB} \pm 3\text{dB}$  a 1kHz.

Techman Electronics Inc. USA. [www.techman-usa.com](http://www.techman-usa.com)

- Micrófono Dinámico jWIN JM-P30. [Micrófono B]

Especificaciones:

- Tipo: Dinámico.
- Dirección: unidireccional.
- Frecuencia: 80Hz-12kHz.
- Impedancia de salida:  $600\Omega$ .
- Potencia máxima de entrada: 100mW.