



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE TRANSMISIÓN Y  
RECEPCIÓN DE AUDIO MEDIANTE UN SISTEMA OFDM CON  
DISTINTAS TASAS DE CODIFICACIÓN DE CANAL,  
SINCRONIZACIÓN DE TRAMA , ENCRIPTACIÓN”**

**EXAMEN COMPLEXIVO, COMPONENTE PRÁCTICO  
INFORME DE PROYECTO**

Previa a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

**Ing. Lourdes Fernanda Bravo Quintuña**

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de manera especial y sincera a mi coordinador de la maestría al Ph.D. Boris Ramos y a la Ing. Maricela Freire, por su apoyo incondicional invaluable para el desarrollo de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mi Padre porque sé que siempre creíste en mí, por el espíritu de lucha que fue la llama interna que hizo nunca darme por vencida en los momentos difíciles.

A ti Paúl por ser el mejor compañero en todos estos años y tu apoyo incondicional en este camino que hoy termina.

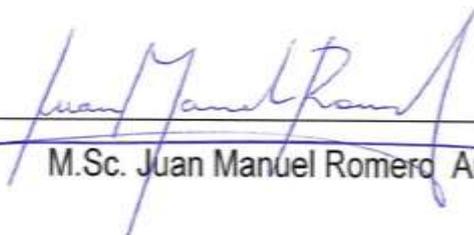
## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

M.Sc. Whashington Medina Moreira

**EVALUADOR**



---

M.Sc. Juan Manuel Romero Arguello.

**EVALUADOR**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe de Proyecto, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Art. 12 del Reglamento de Graduación.



---

Lourdes Bravo Quintuña

C.I.: 0104615869

## RESUMEN

El presente proyecto tiene el objetivo de analizar la implementación de la transmisión y recepción de audio a base del Codificador de Huffman, por medio inalámbrico, desarrollado en los estándares IEEE 802.11a en un sistema OFDM (*Multiplexación por división de Frecuencias Ortogonales*) [1], utilizando las modulaciones QPSK y 16QAM, además de los estimadores de sincronización de trama Schmidl & Cox y corrección del desplazamiento de frecuencia Moose para recibir correctamente la información transmitida.

Además se analiza el proceso de transmisión de información en tiempo real, Enlace –Receptor, a través de las gráficas BER vs SNR. Se aplica distintas tasas de codificación las cuales son probadas con las modulaciones QPSK y 16QAM para identificar el sistema más robusto y confiable a fin de poder establecer la mejor transmisión de audio.

Las mediciones obtenidas de las pruebas que se realizaron fueron planteadas en los siguientes escenarios: Ambiente Real y Ambiente Simulado utilizando la plataforma NI USRP del cual se desprenden las gráficas BER vs SNR para su posterior análisis.

Palabras Claves: OFDM, Huffman, Moose, Schmidl & Cox, USRP.

## CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	III
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	V
<b>CONTENIDO</b> .....	vi
<b>ABREVIATURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>MARCO TEORICO</b> .....	13
<b>1.1. DESARROLLO DE CONTENIDOS</b> .....	13
1.1.1.    Parámetros definidos para la simulación del proyecto .....	15
1.1.2.    -Parámetros definidos para Canal Multipasos.....	15
1.1.3.    -Encriptación y Desencriptación .....	17
<b>1.2. SISTEMA OFDM</b> .....	18
<b>1.3. TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE AUDIO</b> .....	20
1.3.1.    Codificador y Decodificador de Huffman.....	21
<b>1.4. MODULACIONES QPSK Y 16 QAM</b> .....	23
1.4.1.    Modulación QPSK.....	23
1.4.2.    Modulación 16 QAM.....	24

1.5. DESVANECIMIENTO SELECTIVO Y DESVANECIMIENTO PLANO.....	25
1.5.1. Desvanecimiento Selectivo .....	25
1.5.2. Desvanecimiento Plano.....	27
1.6. ALGORITMO DE SINCRONIZACIÓN DE TRAMA Y DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA .....	30
1.7. CODIFICADOR DE CANAL .....	32
1.8. ANALISIS DE RESULTADOS .....	33
1.8.1. Pruebas en canal Indoor vs canal Outdoor para modulación 16QAM Y QPSK 33	
1.8.2. B .Prueba de rendimiento para Modulaciones de 16 QAM y QPSK .....	36
1.8.3. Análisis de variaciones utilizando distintas tasas de codificación. ....	38
1.8.4. Pruebas de variación de RB vs SNR.....	41
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>44</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>46</b>

## ABREVIATURAS

BER	
Bit Error Rate.....	13
DCT	
Transformada Discreta de Coseno.....	12
FFT	
Transformada de Fourier .....	18
IDCT	
Transformada Inversa de Coseno .....	12
IFFT	
Transformada inversa de Fourier.....	17
OFDM	
Multiplexación por división de frecuencias ortogonales.....	12
QPSK	
Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura escalonada .....	12
SNR	
Relación señal ruido .....	13
USRP	
Universal Software Radio Peripheral .....	23

## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Diagrama de Flujo de Encriptación Simétrica .....	17
Fig. 2 Sistema OFDM Transmisor -Receptor.....	19
Fig. 3 Transmisor de audio [9].....	21
Fig. 4 Receptor de Audio [9].....	21
Fig. 5 Señal muestreada de audio en el Transmisor .....	22
Fig. 6 Señal muestreada de audio en el Receptor.....	22
<b>Fig. 7</b> Señal muestreada de audio en el Receptor con ruido .....	23
Fig. 8 Constelación de la Modulación QPSK [11].....	24
Fig. 9 Constelación de la Modulación 16 QAM [12].....	24
Fig. 10 . Respuesta de canal QPSK, 10 MHz.....	25
Fig. 11 Power Delay Profile ambiente Indoor .....	26
Fig. 12 Respuesta de canal 16 QAM , 10 MHz.....	28
Fig. 13 Power Delay Profile ambiente Indoor .....	28
Fig. 14 Desplazamiento de frecuencia corregido en modulación QPSK ...	31
Fig. 15 Desplazamiento de frecuencia –No corregido en modulación QPSK .....	32
Fig. 16 Codificador Convolutacional .....	33
<b>Fig. 17</b> BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-QPSK-Real.....	34
<b>Fig. 18</b> BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-QPSK-Simulado .....	34
Fig. 19 BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-16.....	35
Fig. 20 BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor- 16QAM-Simulado.....	35
<b>Fig. 21</b> BER vs SNR, Canal Indoor (A) , Modulación QPSK y 16QAM-Real- Simulado .....	36
Fig. 22 BER vs SNR , Canal Indoor (B) , Modulación QPSK y 16QAM-Real- Simulado .....	37
Fig. 23 BER vs SNR, Canal Outdoor (A) , Modulación QPSK y 16QAM-Real- Simulado .....	37
Fig. 24 BER vs SNR, Canal Outdoor (B) , Modulación QPSK y 16QAM-Real- Simulado .....	38
<b>Fig. 25</b> BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación- 16 QAM -Real.....	39

Fig. 26 BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-16 QAM –simulado .....	39
<b>Fig. 27</b> BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK.-Real .....	40
<b>Fig. 28</b> BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK-Simulado .....	40
<b>Fig. 29</b> Rb vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK. ....	41
<b>Fig. 30</b> Rb vs SNR en canal Outdoor (B) con distintas tasas de codificación-QPSK. ....	42
Fig. 31 Rb vs SNR en canal Outdoor (B) con distintas tasas de codificación-16QAM. ....	42

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Parámetros implementados para el sistema OFDM. ....	15
<b>Tabla 2</b> Parámetros de Ambiente Indoor Comerciales.....	16
<b>Tabla 3</b> Parámetros de Ambiente Outdoor –Áreas Rurales .....	16

## INTRODUCCIÓN

El avance en el sector de las telecomunicaciones ha promovido la implementación de nuevas técnicas para obtener sistemas más estables como la modulación en OFDM que presenta un ahorro de espectro, menor interfaz RF y mayor robustez al multitrayecto en los canales de radiodifusión.

En las comunicaciones inalámbricas, existen muchos inconvenientes que se pueden presentar al momento de transmitir una señal, entre los principales tenemos el desvanecimiento de la señal, la reflexión y el multitrayecto, por lo que es importante analizar en OFDM, el comportamiento que se observa en un canal plano-selectivo a través de los ambientes Indoor y Outdoor variando el parámetro del SNR tal como se plantea en este trabajo.

Este proyecto tiene varias etapas, entre las principales se encuentra la transmisión y recepción de audio, para lo cual se utiliza el algoritmo de Huffman, la DCT (Transformada Discreta de Coseno) y la IDCT (Transformada Inversa de Coseno) con el objetivo de realizar la compresión de los datos, una vez obtenida la señal de audio la ingresamos como fuente para iniciar la expansión del Sistema de OFDM, en esta etapa la señal es enviada a un codificador o decodificador convolucional, el cual nos garantiza a través de la redundancia que los datos sean transmitidos de manera confiable y sin errores, aplicando varias tasas de bits ( $1/2$ ,  $2/3$ ), para verificar mediante pruebas el desempeño de OFDM frente a las modulaciones QPSK y 16 QAM.

Otra etapa importante es la sincronización de trama la cual utiliza, los estimadores Schmidl & Cox que permite encontrar el tiempo de símbolo en OFDM, corregir los desplazamientos de trama y frequency Offset. [2] Otro estimador comúnmente utilizado es el de Moose, que se encarga de la corrección del desplazamiento de frecuencia [3], esto ayuda a mejorar el rendimiento del sistema.

También se implementa la encriptación simétrica que consiste en ingresar una clave en el transmisor y receptor convirtiendo los caracteres en código binario para introducirlos al inicio de la trama para luego compararlos con el mensaje que llega al receptor, si la clave se encuentra errónea, el mensaje no podrá ser descifrado.

## **MARCO TEORICO**

El desarrollo de este proyecto se enmarca en los parámetros que son definidos a continuación, por ejemplo los canales Indoor y Outdoor cuentan con ciertos números de pasos ya definidos que se detallan en la Tabla 1 y Tabla 2, también se desea verificar cual es la relación BER vs SNR dependiendo las modulaciones y las distintas tasas de codificación del codificador convolucional y cómo afecta al desempeño del Sistema OFDM.

### **1.1. DESARROLLO DE CONTENIDOS**

El avance en el sector de las telecomunicaciones ha promovido la implementación de nuevas técnicas para obtener sistemas más estables como

la modulación en OFDM que presenta un ahorro de espectro, menor interfaz RF y mayor robustez al multitrayecto en los canales de radiodifusión.

En las comunicaciones inalámbricas, existen muchos inconvenientes que se pueden presentar al momento de transmitir una señal, entre los principales tenemos el desvanecimiento de la señal, la reflexión y el multitrayecto, por lo que es importante analizar en OFDM, el comportamiento que se observa en un canal plano-selectivo a través de los ambientes Indoor y Outdoor variando el parámetro del SNR tal como se plantea en este trabajo.

Este proyecto tiene varias etapas, entre las principales se encuentra la transmisión y recepción de audio, para lo cual se utiliza el algoritmo de Huffman, la DCT (Transformada Discreta de Coseno) y la IDCT (Transformada Inversa de Coseno) con el objetivo de realizar la compresión de los datos, una vez obtenida la señal de audio la ingresamos como fuente para iniciar la expansión del Sistema de OFDM, en esta etapa la señal es enviada a un codificador o decodificador convolucional, el cual nos garantiza a través de la redundancia que los datos sean transmitidos de manera confiable y sin errores, aplicando varias tasas de bits ( $1/2$ ,  $2/3$ ), para verificar mediante pruebas el desempeño de OFDM frente a las modulaciones QPSK y 16 QAM.

Otra etapa importante es la sincronización de trama la cual utiliza, los estimadores Schmidl & Cox que permite encontrar el tiempo de símbolo en OFDM, corregir los desplazamientos de trama y frequency Offset. [2] Otro estimador comúnmente utilizado es el de Moose, que se encarga de la corrección del desplazamiento de frecuencia [3], esto ayuda a mejorar el rendimiento del sistema.

También se implementa la encriptación simétrica que consiste en ingresar una clave en el transmisor y receptor convirtiendo los caracteres en código binario para introducirlos al inicio de la trama para luego compararlos con el mensaje que llega al receptor , si la clave se encuentra errónea , el mensaje no podrá ser descifrado.

### 1.1.1. Parámetros definidos para la simulación del proyecto

Para la implementación del este proyecto se ha utilizado como referencia el Manual de Laboratorio Digital Wireless Communication [4], para expandir el Sistema OFDM se ha tomado los siguientes parámetros:

**Tabla 1** Parámetros implementados para el sistema OFDM.

Tipo de información	Audio
Modulación	QPSK-16QAM
Codificación de canal	Convolucional
Sincronización de Trama	Schmidl & Cox
Encriptación	Simétrica

### 1.1.2. -Parámetros definidos para Canal Multipasos

Como se ha mencionado anteriormente, la simulación se ha realizado utilizando dos ambientes (Indoor Comerciales y Outdoor), aplicando distintos factores de

over sample y sample rate, sobre el modelo ISI para analizar la robustez del sistema en las modulaciones antes mencionadas.

A continuación se detalla los parámetros utilizados para los distintos canales utilizados:

**Tabla 2** Parámetros de Ambiente Indoor Comerciales

<i>Canal A</i>		<i>Canal B</i>	
<b>Delay (nSec)</b>	Avg Power (dB)	Delay (nSec)	Avg Power (dB)
<b>0</b>	0,00	0	0,00
<b>100</b>	-5.9	100	-0.2
<b>200</b>	-14.6	200	-5.4
--	--	400	-6.9
--	--	500	-24.5
--	--	700	-29.7

**Tabla 3** Parámetros de Ambiente Outdoor –Áreas Rurales

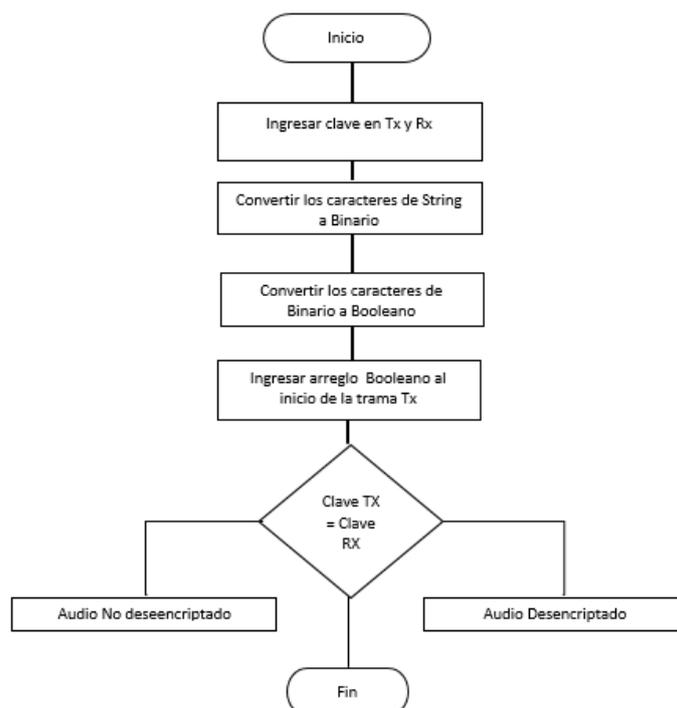
<i>Canal A</i>		<i>Canal B</i>	
<b>Delay (uSec)</b>	Avg Power (dB)	Delay (uSec)	Avg Power (dB)
<b>0</b>	0,00	0	0,00
<b>0.2</b>	-2.0	0.1	-4.0
<b>0.4</b>	-10	0.2	-8.0
<b>0.6</b>	-20	0.3	-12.0
--	--	0.4	-16.0
--	--	0.5	-20.0

### 1.1.3. -Encriptación y Desencriptación

La encriptación para la implementación de este sistema es simétrica, es decir está se basa en emplear una clave privada que se ingresara en el transmisor y receptor para permitir el cifrar y descifrar la información [5].

Esta clave es insertada al inicio de la trama del envío de datos, previamente después de haber realizado la conversión de la clave de string a binario para posteriormente ser comparada con la trama del receptor.

La encriptación se describe a través del siguiente diagrama de flujo:



**Fig. 1** Diagrama de Flujo de Encriptación Simétrica

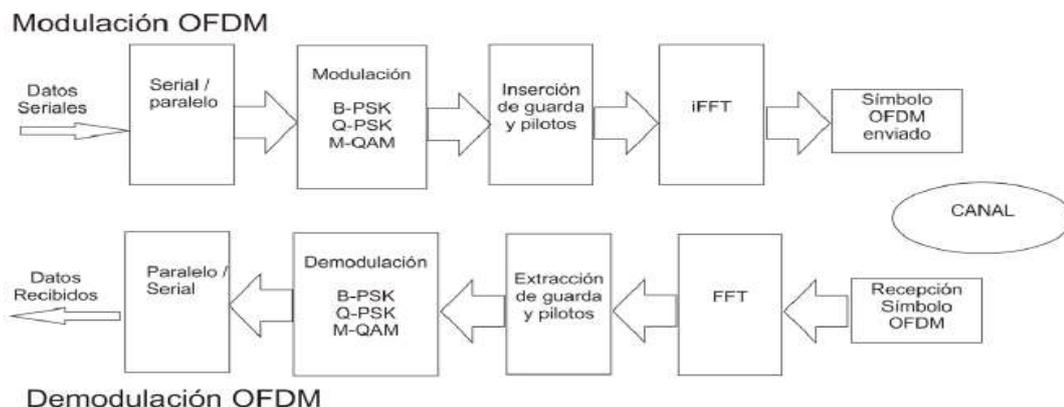
La encriptación simétrica se utiliza para obtener una transmisión segura en los datos, y también es conocida como reversible.

En cuanto a la desencriptación del mensaje se obtiene introduciendo la clave en el receptor, esta es comparada con la información que llega del transmisor, si la clave es correcta el mensaje es descifrado.

## **1.2. SISTEMA OFDM**

Este sistema se emplea en la modulación OFDM, utilizada para transmitir y recibir una gran cantidad de datos, en este caso se aprovecha la multiplexación en frecuencia de las portadoras para transmitir los datos (Audio) en forma independiente, esto se traduce en la optimización del espectro, además de tener la ventaja de ser resistente al multitrayecto., al aplicar el principio de ortogonalidad esto quiere decir que los canales adyacentes no intervienen entre sí.

Para la expansión de nuestro sistema utilizamos el siguiente esquema Transmisor-Receptor.



**Fig. 2** Sistema OFDM Transmisor -Receptor

El hecho de que exista una optimización del espectro en OFDM hace que se genere un procesamiento adicional en el transmisor y en el receptor. Por lo que los datos originados por el transmisor son enviados al modulador realizando una asignación de símbolos, para la conversión de Serial - Paralelo aplicando en la siguiente etapa la IFFT (Transformada Inversa de Fourier), para convertir la señal al Dominio del tiempo y agregar el Prefijo Cíclico el cual sirve para mejorar la Interferencia Intersimbólica, volviéndolo al formato Paralelo –Serial. [6]

El receptor realiza el proceso inverso, la señal necesita ser sincronizada en trama y en frecuencia para ser pasada a través del demodulador para realizar la conversión Serial-Paralelo para aplicar la FFT (Transformada de Fourier) para enviarlo luego a un convertidor Paralelo-Serial, que recupera la señal original [6]

El sistema OFDM que implementaremos se basa el estándar conocido de comunicación de IEEE 803.11a, utilizado para comunicaciones inalámbricas y que opera en la banda de los 5 GHz y tiene 52 subportadoras por cada símbolo de OFDM [7], el cual nos permitirá controlar la interferencia Intersimbólica.

### 1.3. TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE AUDIO

La transmisión del audio comprende en enviar la señal a la etapa de la DCT, convirtiendo la señal de audio en dominio de la frecuencia, para esto se aplica la siguiente fórmula:

$$X_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n & \text{if } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \left( x_n \cos \left( \frac{\pi(n+\frac{1}{2})k}{N} \right) \right) & (1) \end{cases}$$

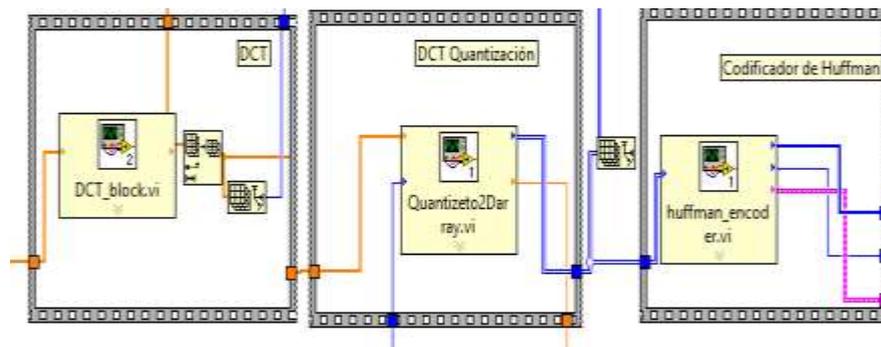
Donde  $X_k$  son los elementos de la matriz y N es el tamaño del bloque.

La DCT, se basa en la transformada de Fourier esta permite formar un arreglo de números reales de NxN posiciones.

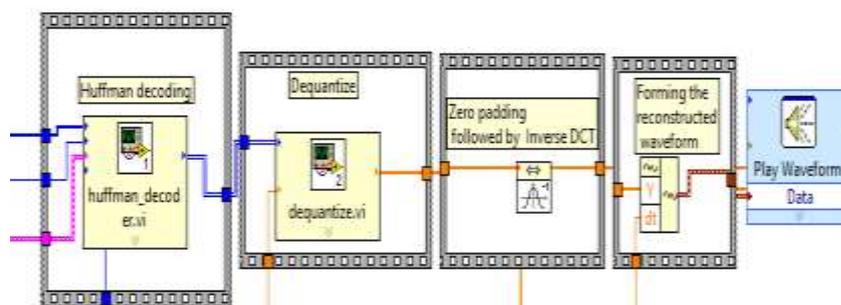
El algoritmo de DCT permite omitir los coeficientes de valor más bajo con el fin de obtener la compresión de datos conservando la componente de mayor potencia de la señal original. [8]

Esta señal es ingresada al Cuantizador DCT para convertir la señal de decimal a binario para luego enviarla al Codificador de Huffman., en el proceso de recepción de audio se aplica el proceso inverso utilizando al IDCT (Transformada inversa de Coseno).

A continuación se expone el esquema utilizado para la Transmisión y Recepción del Audio.



**Fig. 3** Transmisor de audio [9]

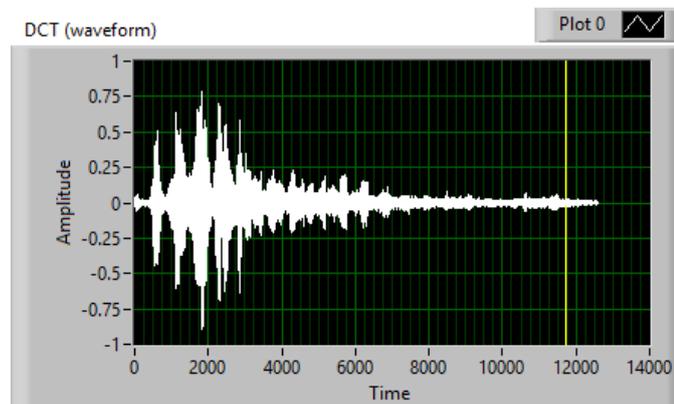


**Fig. 4** Receptor de Audio [9]

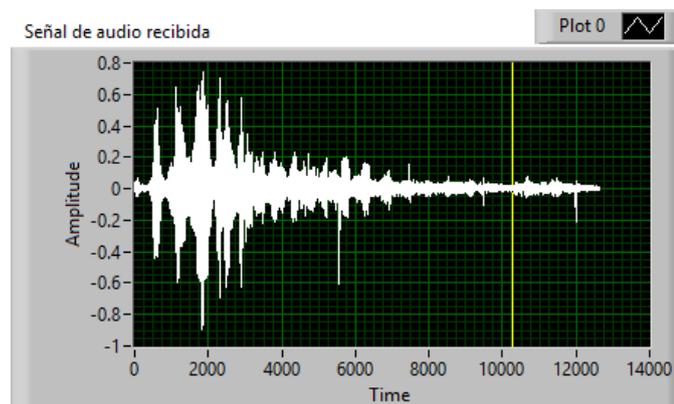
### 1.3.1. Codificador y Decodificador de Huffman

El Algoritmo de Huffman es una técnica de codificación por medio de la entropía, contiene un mínimo de bits por símbolo que forman una cadena. Este conjunto de símbolos son representados por medio de códigos cuya longitud es inversamente proporcional a la probabilidad del símbolo, es decir mientras más se repita un símbolo más corto será su código y viceversa [11].

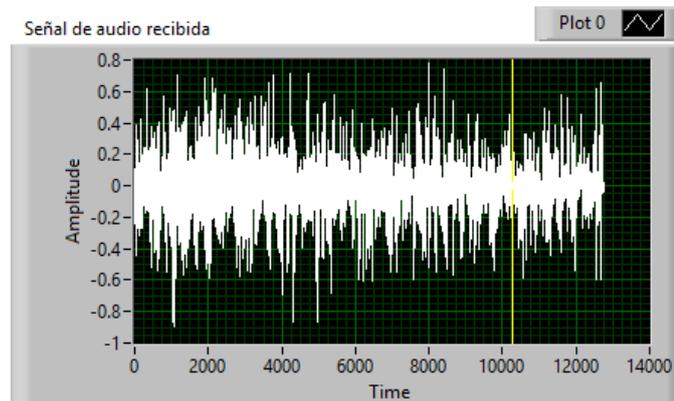
Y en referencia al Decodificador de Huffman se aplica el proceso inverso de la DCT y reconstruye los datos originales a través de una aproximación de ellos después de haber aplicado la compresión con pérdida.



**Fig. 5** Señal muestreada de audio en el Transmisor



**Fig. 6** Señal muestreada de audio en el Receptor



**Fig. 7** Señal muestreada de audio en el Receptor con ruido

## 1.4. MODULACIONES QPSK Y 16 QAM

### 1.4.1. Modulación QPSK

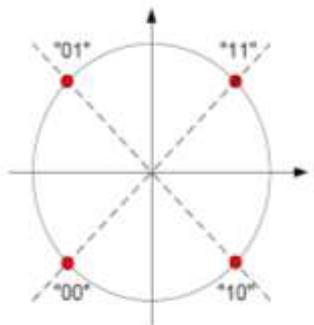
En la modulación QPSK, codificación por cambio de fase en cuadratura , se caracteriza por tener cuatro símbolos , los que estarán desplazados  $90^\circ$  , cada símbolo trasmite dos bits, una importante ventaja de esta modulación es que mantiene los niveles altos de potencia en todos sus símbolos, teniendo el beneficio de una mejor protección contra los errores.

La modulación QPSK, se representa con la siguiente fórmula:

$$V_{QPSK}(t) = I \cos w_c t + Q \sin w_c t \quad (2)$$

Donde  $I=Q= 1$  para valor binario 1

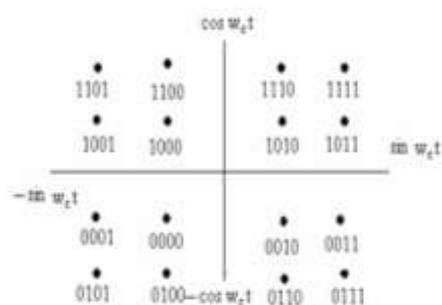
$I=Q= -1$  para valor binario 0



**Fig. 8** Constelación de la Modulación QPSK [11]

#### 1.4.2. Modulación 16 QAM

La modulación en 16 QAM o modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), divide los datos en grupos de 8 bits y estos en subgrupos de 4 bits , generando 16 posibles combinaciones que la amplitud y fase de la portadora por lo que se obtiene 16 estados diferentes. [12]



**Fig. 9** Constelación de la Modulación 16 QAM [12]

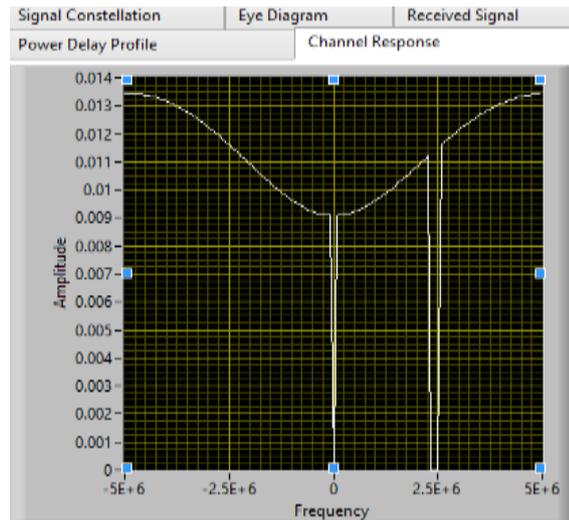
La modulación 16 QAM tiene la desventaja de ser más sensible al ruido, ya que los símbolos están más cercanos, por lo que hace al sistema inestable a la ISI.

## 1.5. DESVANECIMIENTO SELECTIVO Y DESVANECIMIENTO PLANO

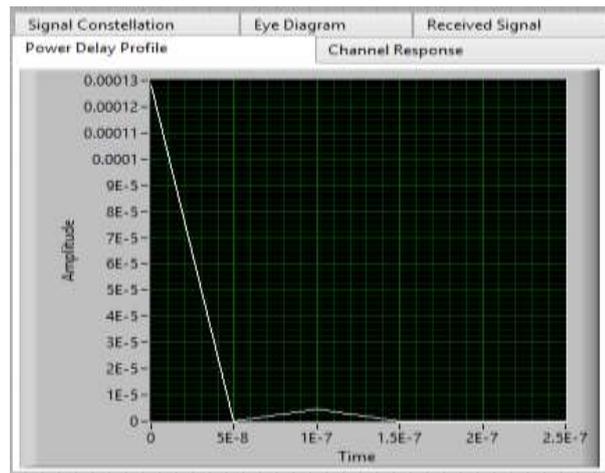
### 1.5.1. Desvanecimiento Selectivo

Se denomina canal selectivo cuando  $B_w \geq B_c$ , donde  $B_w$  es el ancho de Banda transmitida y  $B_c$  es el ancho de Banda coherente, esto quiere decir que el canal no se distorsiona por la interferencia de la atmosfera y conserva el espectro de la señal transmitida.

A continuación con ayuda de los dispositivos USRP y los parámetros establecidos en la Tabla 1. Ambiente Indoor, canal (A), se compara  $B_w$  que es el ancho de Banda transmitido con  $B_c$ , determinado como ancho de Banda Coherente, con modulación QPSK.



**Fig. 10 .** Respuesta de canal QPSK, 10 MHz



**Fig. 11** Power Delay Profile ambiente Indoor

Estableciendo los siguientes parámetros de configuración para el transmisor y receptor:

- Tx over sample: 2
- Tx sample rate: 20 M
- Rx oversample: 2
- Rx sample rate; 20 M
- Modulación: QPSK
- FFT: 128
- Bw = Symbol rate =  $\frac{Tx \text{ sample rate}}{Tx \text{ over sample}} = \frac{20 \text{ M}}{2} = 10 \text{ MHz}$

Para calcular el ancho de Banda Coherente utilizamos las siguientes fórmulas:

$$\text{Retardo medio} = \tau = \frac{\sum_k T_k \phi h(0; T_k)}{\sum_k \phi h(0; T_k)} \quad (3)$$

Donde  $\phi h(0; T_k)$  es la potencia recibida con retardo  $T_k$ .

$$\text{Segundo Momento} = T^2 = \frac{\sum_k T_k^2 \phi h(0; T_k)}{\sum_k \phi h(0; T_k)} \quad (4)$$

$$\text{Dispersión rms del retardo} = \sigma_t = \sqrt{T^2 - (\tau)^2}$$

Retardo medio:

$$\tau = \frac{(0)(1)+(0.1)(0.2570)+(0.2)(0.34)}{(1+0.2570+0.034)} = 0.025\mu s$$

Segundo momento:

$$T^2 = \frac{(0)^2(1)+(0.1)^2(0.2570)+(0.2)^2(0.34)}{(1+0.2570+0.034)} = 3.04 \times 10^{-3}\mu s$$

Dispersión rms del retardo:

$$\sigma_t = \sqrt{0.025\mu s - 3.04 \times 10^{-3}\mu s^2} = 0.049\mu s$$

Banda Coherente:

$$B_c = \frac{1}{50 \cdot \sigma_t} = \frac{1}{50 \cdot 0.049\mu s} = 0.40\text{ MHz}$$

Ancho de Banda de subportadora se define como:

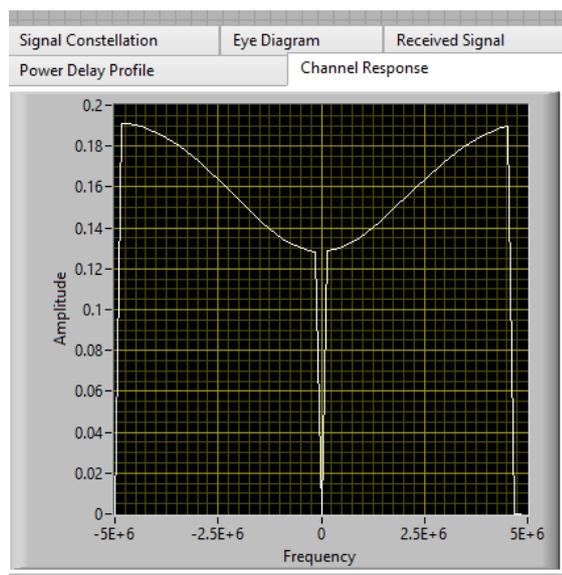
$$B_w = \frac{B_{ofdm}}{N} = \frac{10\text{ MHz}}{128} = 0.781\text{ MHz}$$

Por lo cual se corrobora que  $B_w \geq B_c$  por lo tanto es un canal selectivo, es decir el canal es de Banda Ancha,

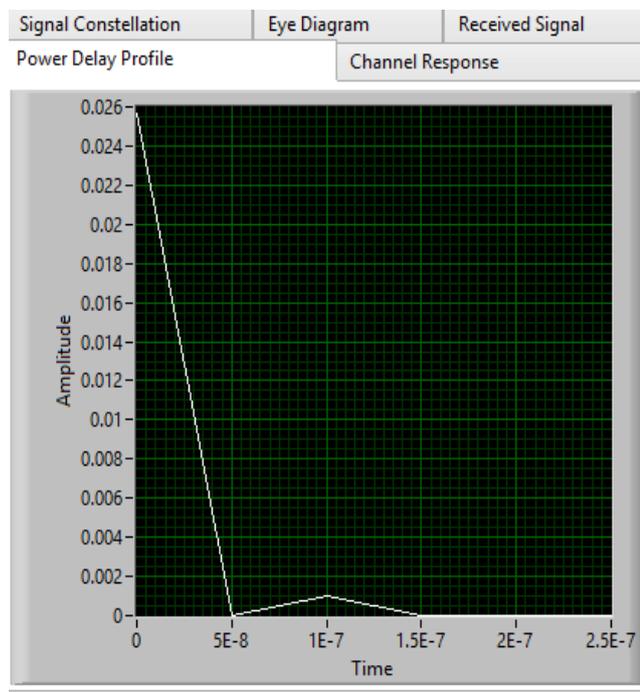
El problema del desvanecimiento selectivo, se soluciona usando varias subportadoras que trabajan de manera individual para transmitir la información y con un mayor tiempo de símbolo que permite reducir la interferencia.

### 1.5.2. Desvanecimiento Plano

Se denomina Desvanecimiento Plano si  $B_w \leq B_c$ , es decir que conserva el espectro de la señal transmitida, se utilizó la Tabla 1, Ambiente Indoor para analizar el ancho de Banda transmitida vs el ancho de Banda coherente, con una modulación de 16QAM se obtuvo las siguientes gráficas:



**Fig. 12** Respuesta de canal 16 QAM , 10 MHz



**Fig. 13** Power Delay Profile ambiente Indoor

Para calcular el Deep Fading se realiza la siguiente configuración de los parámetros en el transmisor y receptor:

- Tx over sample: 2
- Tx sample rate: 20 M
- Rx oversample: 2
- Rx sample rate; 20 M
- Modulación: 16 QAM
- FFT: 64
- $Bw = \text{Symbol rate} = \frac{\text{Tx sample rate}}{\text{Tx over sample}} = \frac{20 \text{ M}}{2} = 10 \text{ MHz}$

Para el cálculo de la Banda Coherente, se toma las ecuaciones antes descritas como referencia, obteniendo los siguientes resultados después de aplicar la fórmula:

Retardo medio:

$$\tau = 0.025 \mu s$$

Segundo momento:

$$T^2 = 3.04 \times 10^{-3} \mu s$$

Dispersión rms del retardo:

$$\sigma_t = 0.049 \mu s$$

Ancho de Banda Coherente:

$$B_c = 0.40 \text{ MHz}$$

Ancho de Banda de subportadora

$$B_w = 0.15 \text{ MHz}$$

Con estos resultados podemos definir que el canal es plano, porque el ancho de banda de la subportadora es menor al ancho de banda coherente lo que se comprueba en la figura 12.

Se puede decir que el canal es selectivo, ya que presenta mayor amplitud en el Power Delay Profile.

## 1.6. ALGORITMO DE SINCRONIZACIÓN DE TRAMA Y DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA

El sistema de OFDM, funciona como se había mencionado a través de varias subportadoras las cuales transmitirán la información, estas subportadoras se traslapan entre sí pero dependen del tiempo de símbolo para evitar la interferencia.

La sincronización de una señal de OFDM necesita determinar el tiempo de símbolo y el desplazamiento de frecuencia de la subportadora, para estimar el tiempo de símbolo necesitamos de un parámetro CP (Prefijo Cíclico), el cual realiza la estimación del tiempo y frecuencia del sincronismo.

El estimador de autocorrelación utilizado es el método Schmidl and Cox, el cual corrige los desplazamientos frecuencia y sincronización de trama con el uso del tiempo de símbolo. [2]

Para el calcular la métrica la ecuación se define de la siguiente manera:

$$R[d] = \sum_{n=0}^{N-1} y * [n + d] * y [n + d + W] \quad (5)$$

Donde W es la longitud de la mitad del período de la secuencia de entrenamiento y N es el número de las subportadoras.

Para el calcular la potencia de la señal recibida:

$$R[d] = [y [n + d + W]]^2 \quad (6)$$

De las ecuaciones (5) y (6), se obtiene la aproximación del parámetro de retardo D, el cual se resuelve de la siguiente expresión:

$$\hat{d} = \operatorname{argmax} M[d] \quad (7)$$

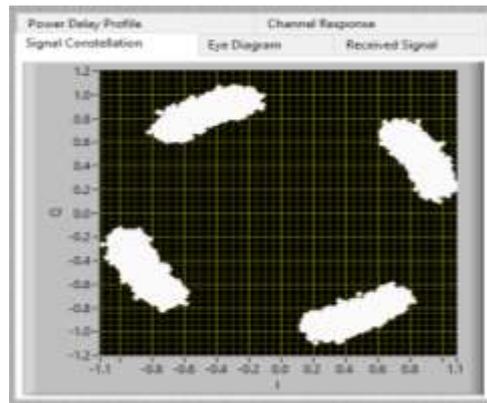
Esta ecuación nos permite estimar el desplazamiento de la trama

Para el calcular el desplazamiento de frecuencia, se utiliza la siguiente fórmula:

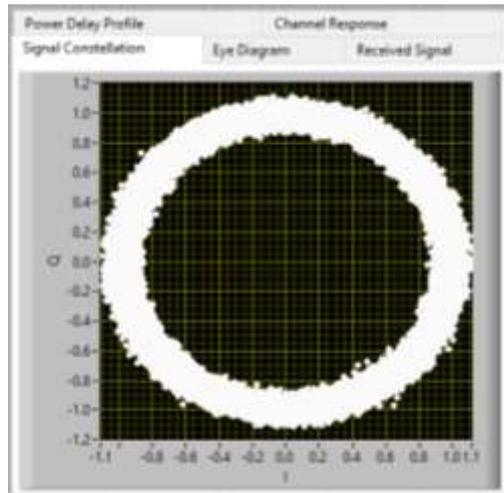
$$y[n] = e^{j2\pi\epsilon n} h s[n] + v[n] \quad (6)$$

Esta ecuación se basa en el estimar  $e^{j2\pi\epsilon n}$ , que es el símbolo transmitido rotado mientras mayor sea  $n$ , mayor será el desplazamiento de frecuencia debido ya que los símbolos rotan fuera de sus regiones.

El efecto de la corrección del desplazamiento de frecuencia es demostrado en la figura 13 con una modulación QPSK, donde los símbolos han sido estimados.



**Fig. 14** Desplazamiento de frecuencia corregido en modulación QPSK



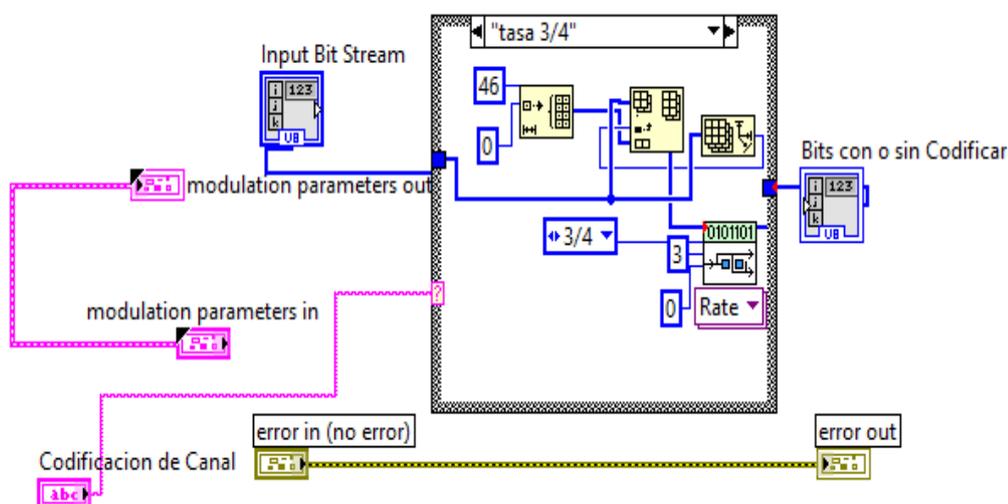
**Fig. 15** Desplazamiento de frecuencia –No corregido en modulación QPSK

En este caso el desplazamiento de frecuencia no fue estimado, y se perdió la información por interferencia intersimbólica.

### 1.7. CODIFICADOR DE CANAL

Una vez obtenida la señal de audio la ingresamos como fuente para iniciar la expansión en el Sistema OFDM -transmisor, en esta etapa los datos serán enviados al Codificador Convolutivo para corregir las interferencias ocasionadas por la transmisión, para lo cual se aplicarán distintas tasas de codificación ( $1/2$  ,  $2/3$  y Sin Codificar ) , para obtener y comportamiento entre los formados de subportadora QPSK y 16 QAM.

El Codificador Convolutivo nos garantiza que los datos transmitidos sean confiables y sin errores por medio de la redundancia, esto es lo que llamamos codificación de canal.



**Fig. 16** Codificador Convolutivo

## 1.8. ANALISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas en el sistema OFDM, implementado consisten en transmitir una señal de audio en formato .wav , en distintos canales y la respuesta obtenida BER vs SNR con las distintas tasas de codificación aplicadas a las modulaciones 16 QAM y QPSK.

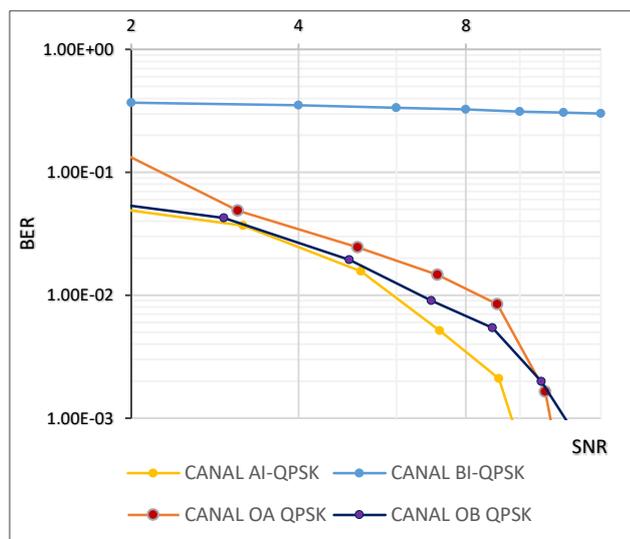
### 1.8.1. Pruebas en canal Indoor vs canal Outdoor para modulación

#### 16QAM Y QPSK

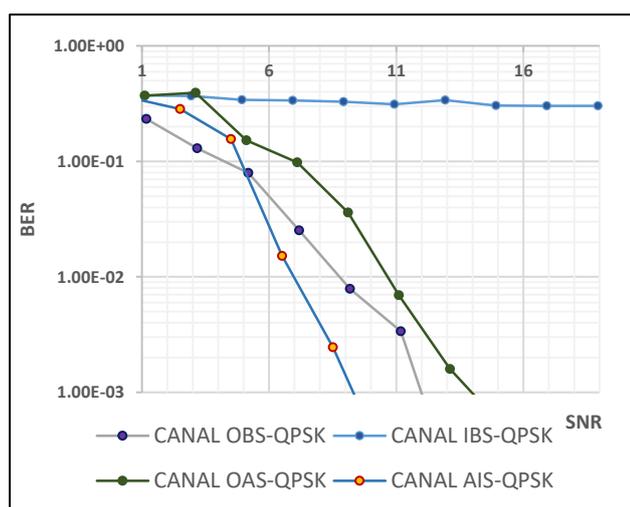
Primero se analiza la respuesta del Canal Real vs el Simulado, para esto se utilizó el modelado del canal ISI.

Además se compara las gráficas del Canal Indoor vs el Canal Outdoor con el objetivo de conocer cuál es el mejor medio de transmisión.

A continuación se indican las gráficas obtenidas de la Simulación Indoor vs Outdoor, para las modulaciones QPSK y 16 QAM.



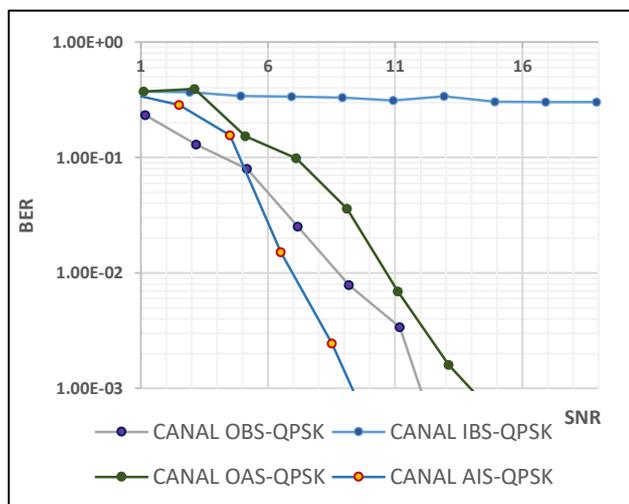
**Fig. 17** BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-QPSK-Real



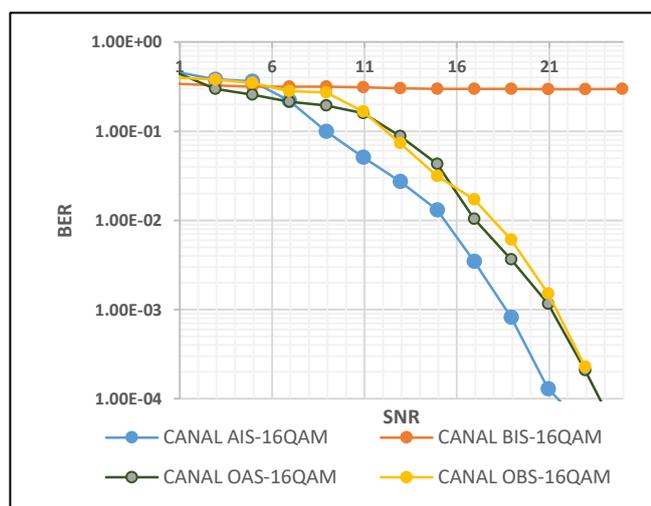
**Fig. 18** BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-QPSK-Simulado

Como se puede observar en las gráficas de las figura 17 y figura 18, el canal Indoor presenta un mejor rendimiento ante el BER que el canal Outdoor debido

a que este canal es menos resistente al multitrayecto, por lo que genera mayor ISI.



**Fig. 19** BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor-16 QAM-Real



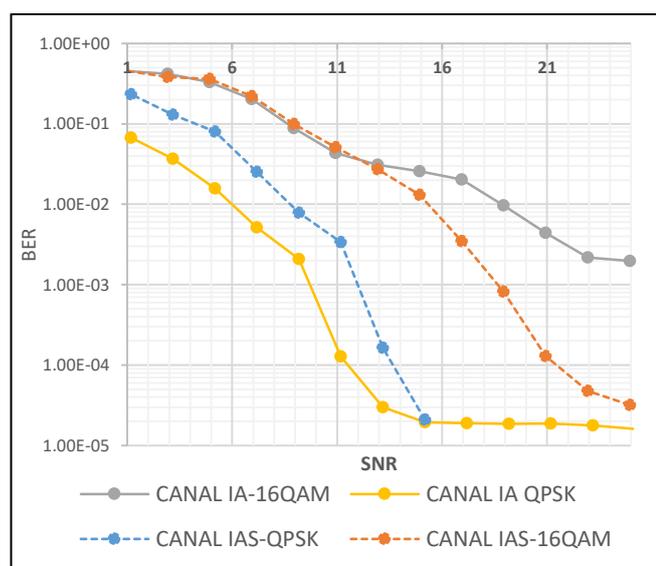
**Fig. 20** BER vs SNR, en Canal Indoor-vs Outdoor- 16QAM-Simulado

Como se puede indicar en las gráficas de las figura 19 y figura 20, el patrón se repite nuevamente el canal Indoor tiene un mejor rendimiento ante el BER que el canal Outdoor para la modulación 16QAM.

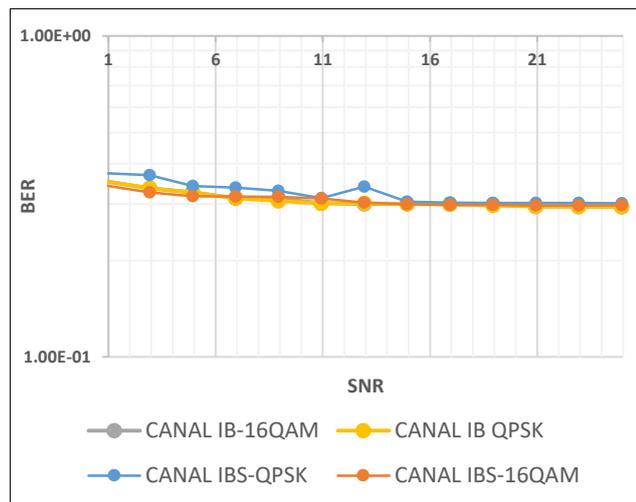
### 1.8.2. B .Prueba de rendimiento para Modulaciones de 16 QAM y QPSK

Las pruebas de rendimiento de las modulaciones se realizan en los escenarios de los canales Indoor y Outdoor,

En la modulación QPSK se conoce que es más robusta ante los errores, mientras que en la modulación 16 QAM es un sistema más inestable, esto significa que existe más probabilidad que la información llegue incorrectamente.

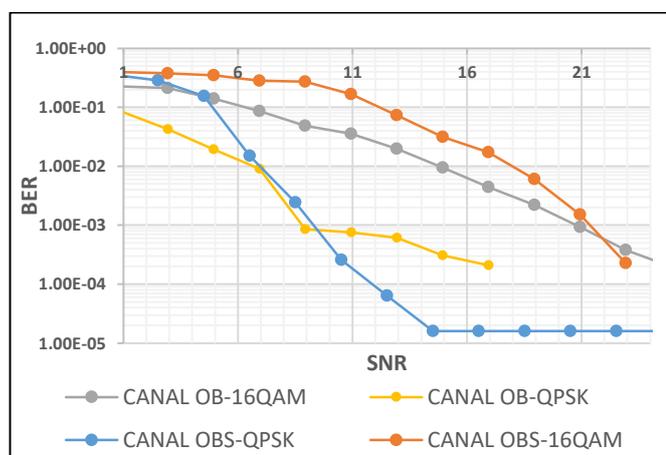


**Fig. 21** BER vs SNR, Canal Indoor (A), Modulación QPSK y 16QAM-Real-Simulado

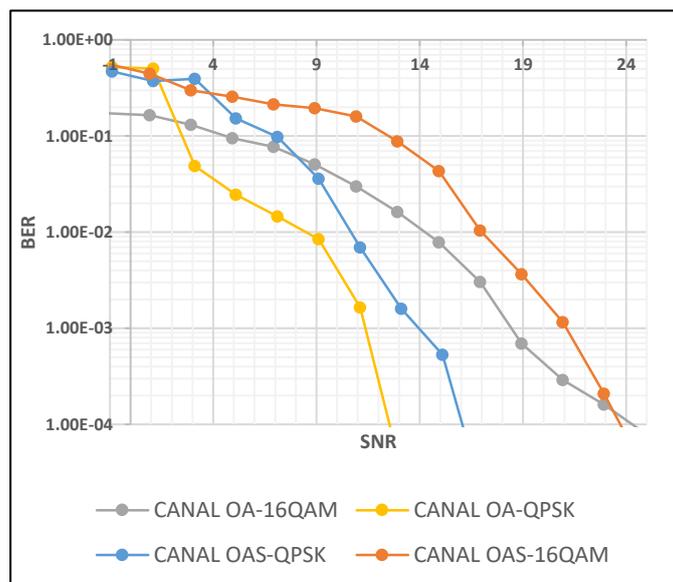


**Fig. 22** BER vs SNR , Canal Indoor (B) , Modulación QPSK y 16QAM-Real-Simulado

En la Figura 21, se puede definir que la mejor modulación es QPSK, además de tener más tolerancia al BER, para el caso de la Figura 22 , se observa un comportamiento en el cual el ruido es constante , esto se debe a que en el Canal Indoor (B) , es un canal altamente destructivo por lo cual el BER , será constante.



**Fig. 23** BER vs SNR, Canal Outdoor (B), Modulación QPSK y 16QAM-Real-Simulado



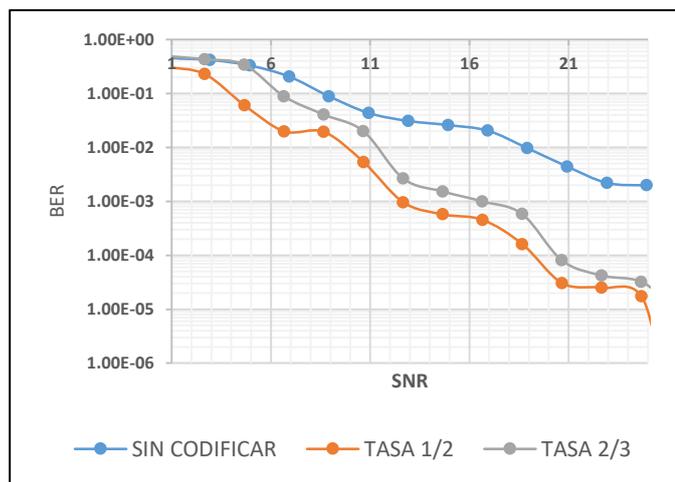
**Fig. 24** BER vs SNR, Canal Outdoor (B) , Modulación QPSK y 16QAM-Real-Simulado

Para el análisis de las figuras 23 y figura 24 podemos observar que el comportamiento se repite nuevamente, la curva de la modulación QPSK es la que mejor respuesta tiene ante el BER, mientras que la modulación 16 QAM tiene peor rendimiento.

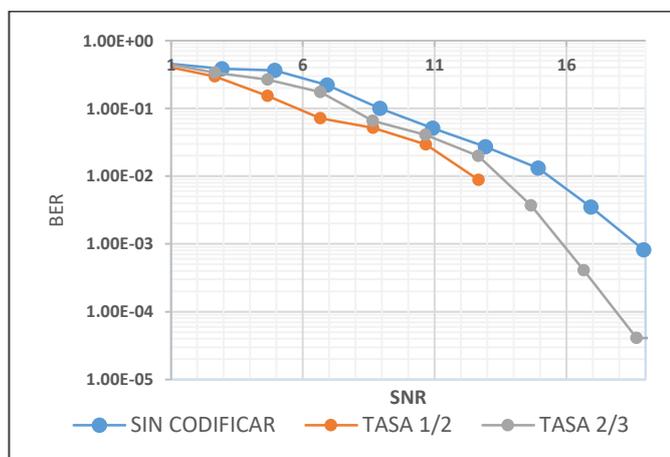
### 1.8.3. Análisis de variaciones utilizando distintas tasas de codificación.

Para la adquisición de datos con el codificador convolucional se utiliza las métricas de 1/2, 2/3 y sin codificar, con el fin de saber con cual es la tasa de bits es más eficiente al BER.

Para esto se gráfica la modulación 16 QAM y QPSK con las diferentes tasas en canal Indoor A.

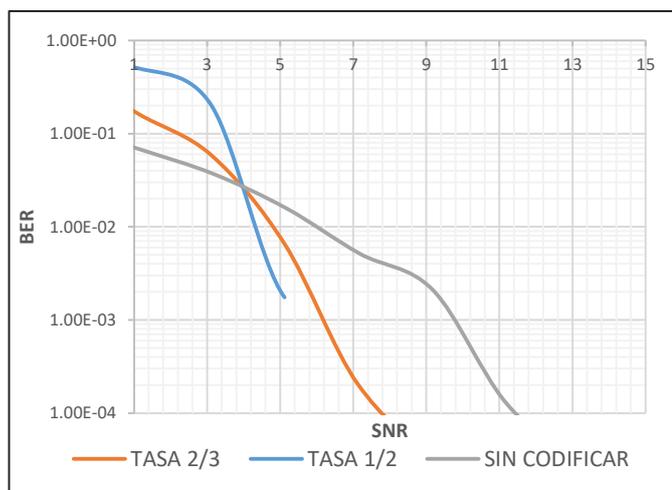


**Fig. 25** BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-  
16 QAM -Real

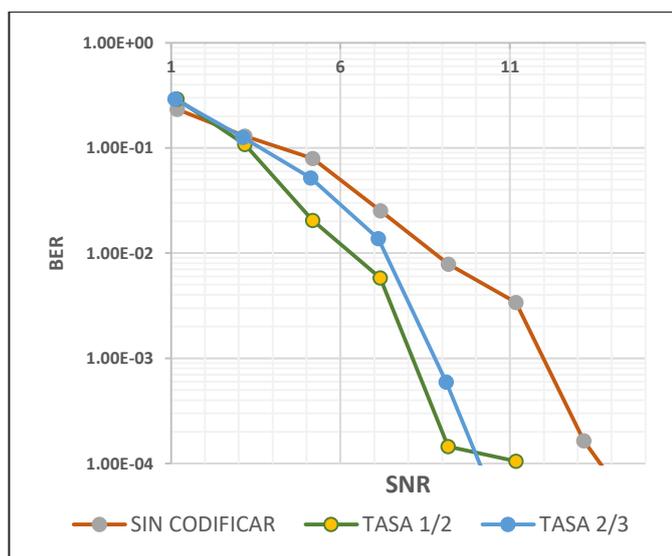


**Fig. 26** BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-  
16 QAM –simulado

En la figura 25 y figura 26 se puede definir la mejor métrica que se puede aplicar en el codificador convolucional para el sistema de OFDM, es la tasa de 1/2 la que presenta un mejor rendimiento, seguida de la tasa de 2/3.



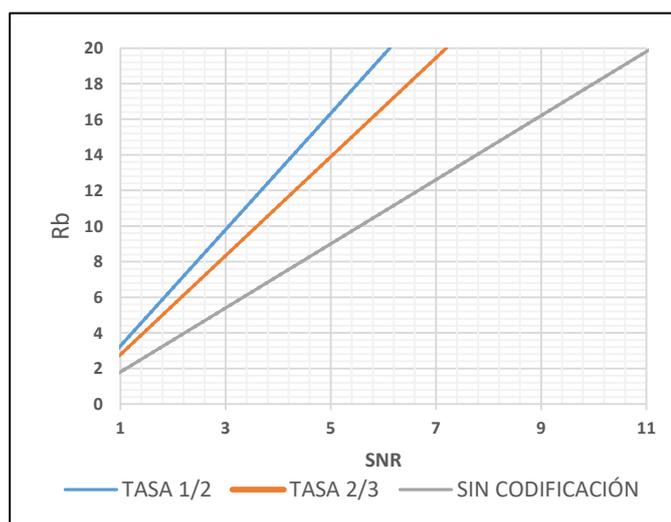
**Fig. 27** BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK.-Real



**Fig. 28** BER vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK-Simulado

Al analizar las figuras 27 y 28 se puede indicar que sigue siendo la mejor tasa de codificación la de 1/2, mostrando un mejor comportamiento ante el BER.

#### 1.8.4. Pruebas de variación de RB vs SNR

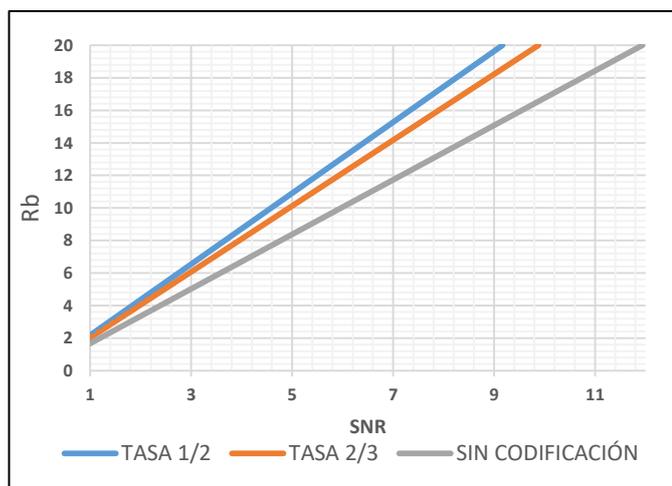


**Fig. 29** Rb vs SNR en canal Indoor (A) con distintas tasas de codificación-QPSK.

Para la figura 29. Se puede observar que la tasa con el mejor comportamiento es con la codificación de 1/2, además se comprueba que la modulación QPSK, es más resistente a la ISI al tener una menor cantidad de bits a transmitir.

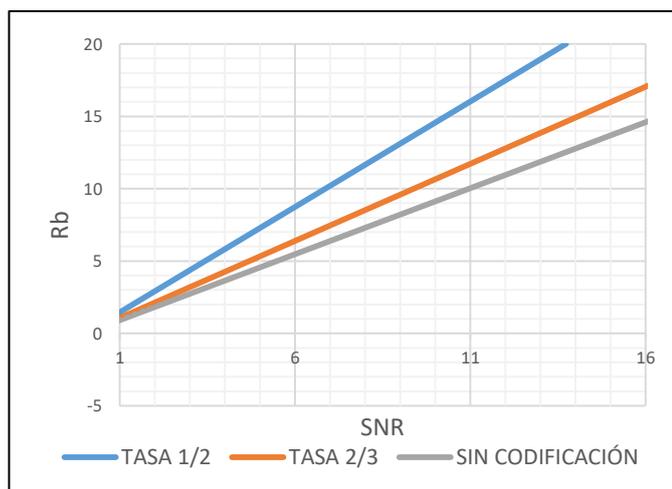
En el caso del análisis del canal Indoor (B), como se había demostrado en la figura 20, el canal es muy destructivo debido a los altos valores negativos de los pasos de la Tabla (B) por lo que el ruido siempre permanece constante y no se obtuvo ninguna transmisión de datos.

También se analiza el comportamiento en el canal Outdoor (B) con las siguientes gráficas:



**Fig. 30**  $R_b$  vs SNR en canal Outdoor (B) con distintas tasas de codificación-QPSK.

En la figura 30, se observa que la modulación QPSK, con la tasa 1/2 es la de mejor comportamiento ante el BER.



**Fig. 31**  $R_b$  vs SNR en canal Outdoor (B) con distintas tasas de codificación-16QAM.

En la gráfica de la gráfica 31, se determina que la modulación 16 QAM con la codificación de 1/2, tiene una mejor respuesta en el canal Outdoor (B) frente al BER.

## CONCLUSIONES

En base a los análisis presentados de las distintas pruebas podemos concluir lo siguiente:

Al comparar los canales Indoor vs Outdoor y las modulaciones QPSK y 16 QAM, se establece que el canal Indoor (A), tiene un mejor comportamiento al multitrayecto porque existe menos desvanecimiento de la señal. Mientras que en un ambiente Outdoor se puede concluir que el rendimiento es menos aceptable. Sin embargo al utilizar un sistema OFDM la señal es transmitida por varios subcanales teniendo ventaja frente a un sistema de única portadora.

En caso del Indoor (B) no fue posible establecer ningún enlace, esto ocurrió para ambas modulaciones, el BER permaneció constante. Este fue el peor escenario por los parámetros definidos en la Tabla 2 canal (B), que resultó ser altamente destructivo.

En referencia a la prueba que se realizó para diferentes modulaciones QPSK y 16 QAM en los canales Indoor y Outdoor, se puede concluir que la modulación con mejor comportamiento es la QPSK , esto debido a que

presenta una menor tasa de bits a transmitir y es más resistente al ruido, debido a los espacios que existen entre sus símbolos.

Es de notar que la modulación 16QAM tiene mayor transmisión de bits por símbolo, por lo que es más conveniente para el uso de transmisión de paquetes elevados de información. Por otro lado esta modulación presenta una peor resistencia ante el SNR, volviéndola más inestable y complicando la manera de estimar el tiempo de símbolo entre las subportadoras por que se pierde la sincronización de trama y de frecuencia.

Finalmente para el análisis de las distintas tasas de codificación se establece que la mejor tasa que podemos utilizar con el codificador convolucional es la de  $1/2$ , porque corrige la ISI de manera más eficiente que la tasa de  $2/3$ , debido a que el codificador agrega bits de redundancia, lo cual brinda confiabilidad al sistema OFDM.

## BIBLIOGRAFÍA

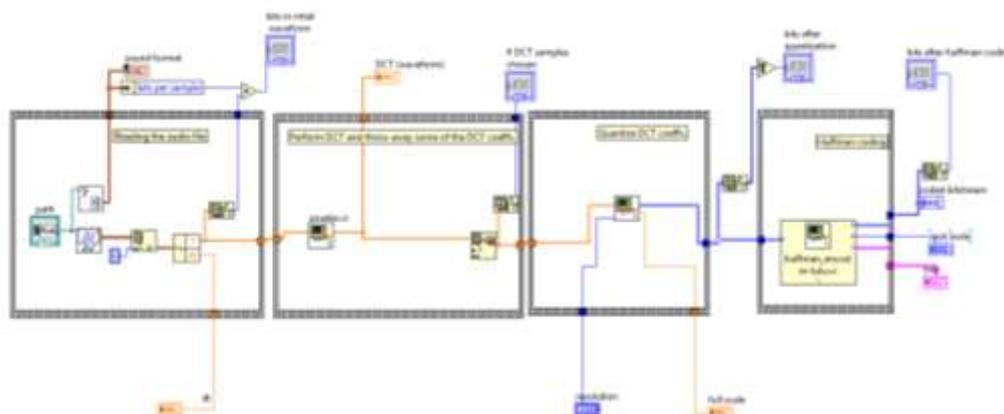
- [1] G. B. Javier, «Optimización algorítmica orientada a la implementación en dispositivos reconfigurables de esquemas multiestándar y multiusuario para sincronismo de frecuencia en sistemas de comunicaciones inalámbricos basados en OFDM,» Madrid, 2011.

- [2] W. Espinoza, M. Freire, T. Chávez, J. Gómez y ,. B. Ramos, «Adaptación del algoritmo Schmidl & Cox a sistemas de portadora única en un canal inalámbrico,» INGENIUS, Guayaquil, 2015.
- [3] C. E. Chancay . & C, «"Diseño , simulación e implemenación de la sincronización de la portadora y de la trama en sistemas OFDM", Tesis de ingeniería , Escuela Superior Politécnica del Litora,» Guayaquil, Ecuador, 2013.
- [4] R. PhD, Digital Wireless Communications: "Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP, "pp 99-138", 2011.
- [5] E. Amieva, «Eneko Amieva,» 13 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <http://enekoamieva.com/criptografia-simetrica-asimetrica-e-hibrida/>. [Último acceso: 04 11 2016].
- [6] O. Nehme Rivas, «"Sistemas de OFDM de alta eficiencia espectral",» Madrid, 2012.
- [7] «802.11 OFDM WLAN,» 2016. [En línea]. Available: [http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm\\_80211-overview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_80211-overview.htm). [Último acceso: 4 noviembre 2016].
- [8] Luke, «Luke Blog,» 28 noviembre 2011. [En línea]. Available: <http://www.lukedodd.com/really-simple-audio-compression/>. [Último acceso: 4 noviembre 2016].
- [9] E. L., «"EE49 Lab1: Source Coding Lab: Cosine Transform (DCT), sample quantization, and Huffman coding" Versión 9,» National Instruments, 2016.
- [10] G. d. R. d. Computadores, «Introducción a la Compresión Huffman y Entropía,» Valencia.
- [11] «Digitale Modulationen,» Alemania, 2011.
- [12] Universidad Don Bosco, «"Sistemas de comunicación 11.Guía 8,» San Salvador.

[13] «SciELO México,» Universidad Autónoma de México, 2008. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.mx/img/revistas/iit/v15n3/a4f11.jpg>. [Último acceso: 4 noviembre 2016].

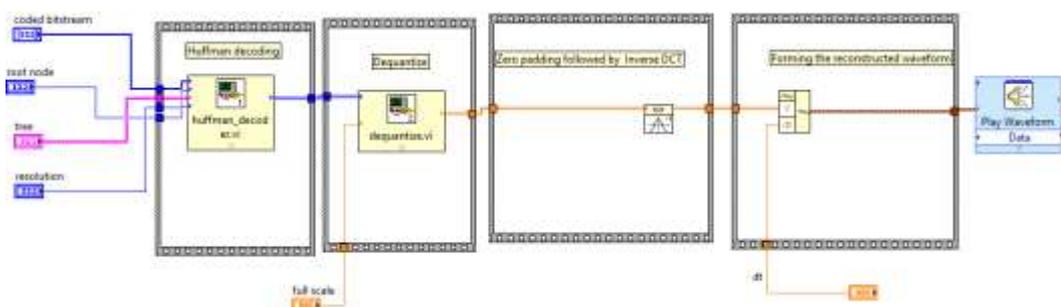
## ANEXO 1

### DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE TRANSMISIÓN DE AUDIO EN LABVIEW



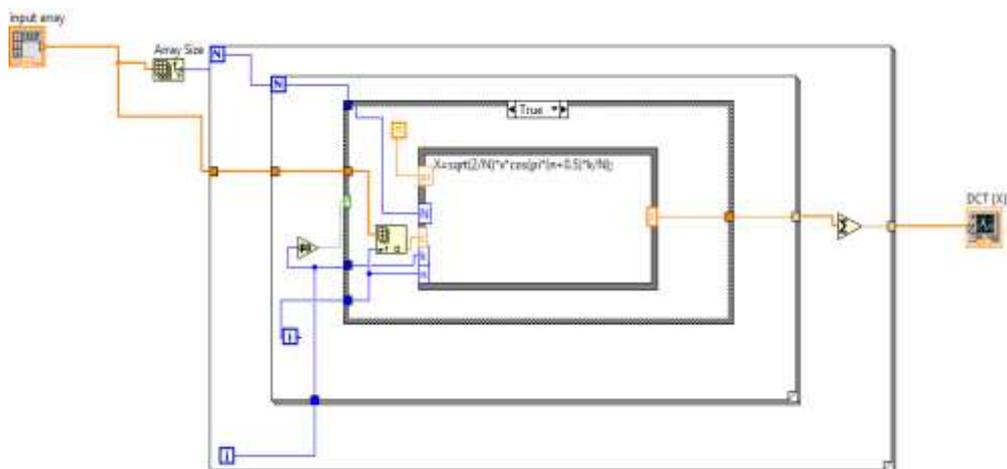
## ANEXO 2

### DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE RECEPCIÓN DE AUDIO EN LABVIEW



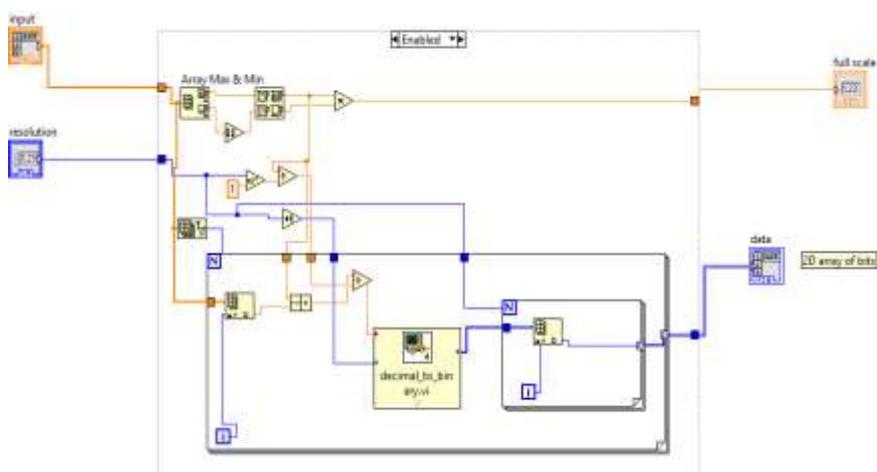
## ANEXO 3

## DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE DCT DE AUDIO EN LABVIEW



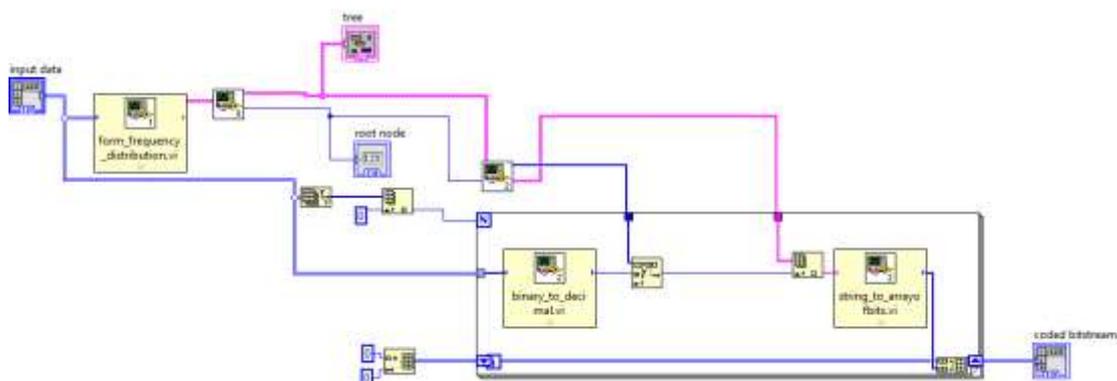
## ANEXO 4

## DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE CUANTIZACIÓN DE AUDIO EN LABVIEW



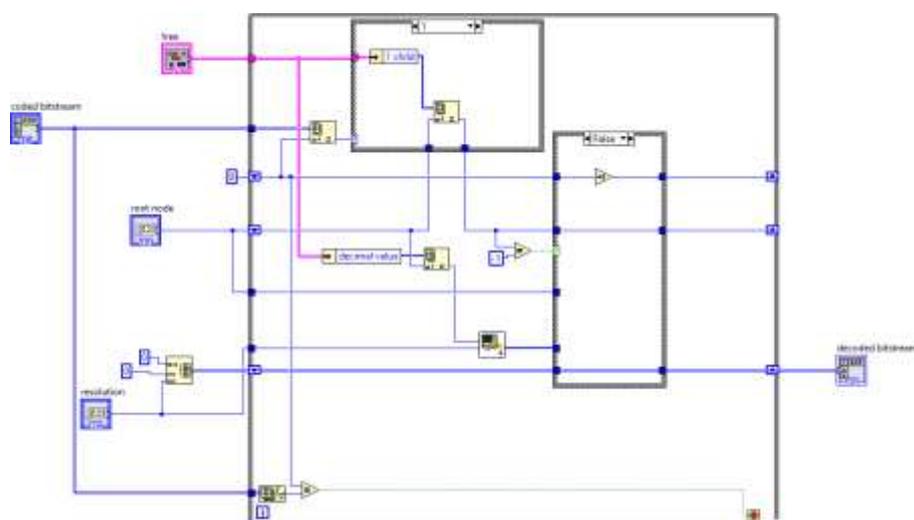
## ANEXO 5

## DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE ETAPA DE CUANTIZACIÓN DE AUDIO EN LABVIEW



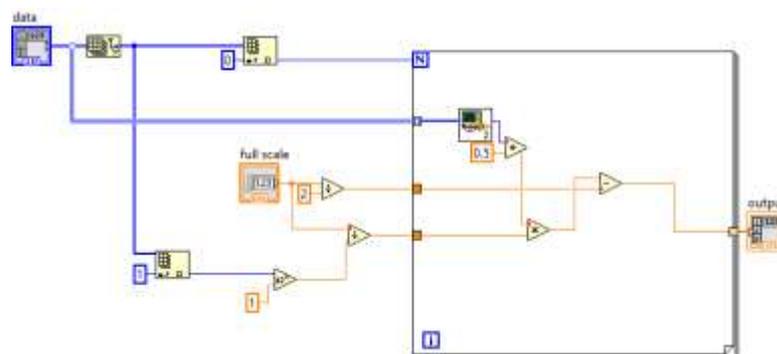
## ANEXO 6

## DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE ETAPA DECODIFICADOR HUFFMAN DE AUDIO EN LABVIEW



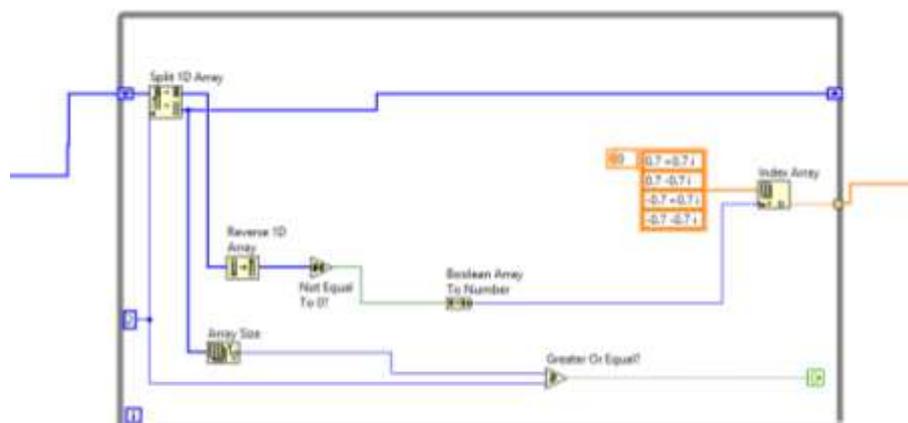
## ANEXO 7

DIAGRAMA DE BLOQUE ETAPA DE ETAPA DESCUANTIZACIÓN DE  
AUDIO EN LABVIEW



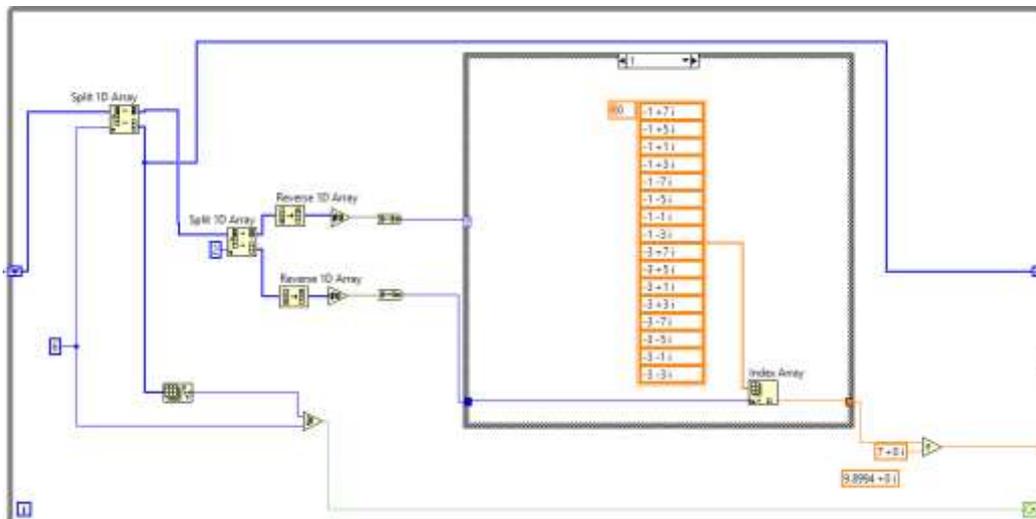
## ANEXO 8

DIAGRAMA DE BLOQUE MODULACION QPSK EN LABVIEW



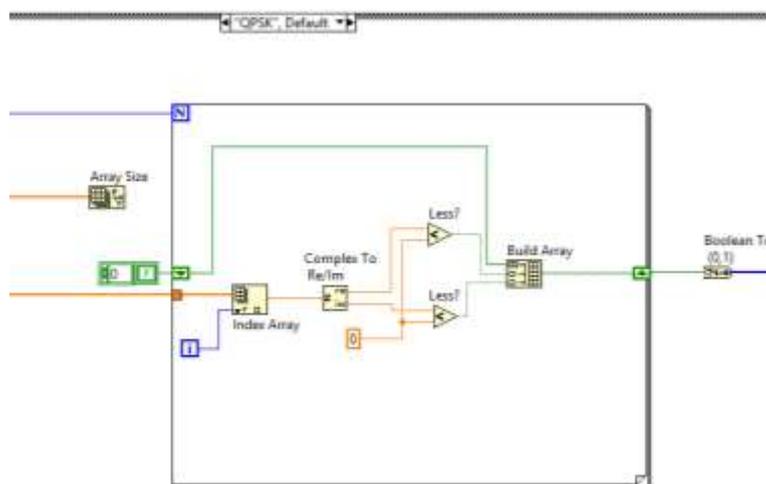
## ANEXO 9

## DIAGRAMA DE BLOQUE MODULACION 16QAM EN LABVIEW



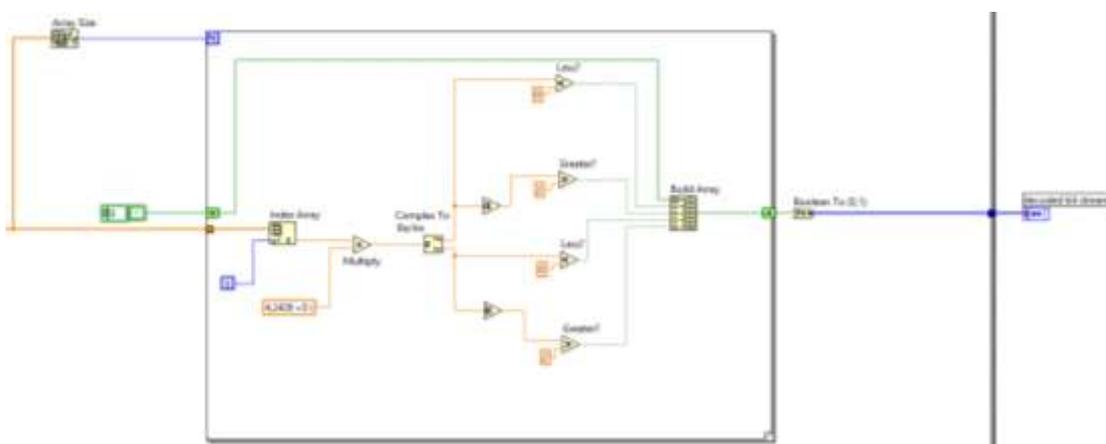
## ANEXO 10

## DIAGRAMA DE BLOQUE DEMODULADOR QPSK EN LABVIEW



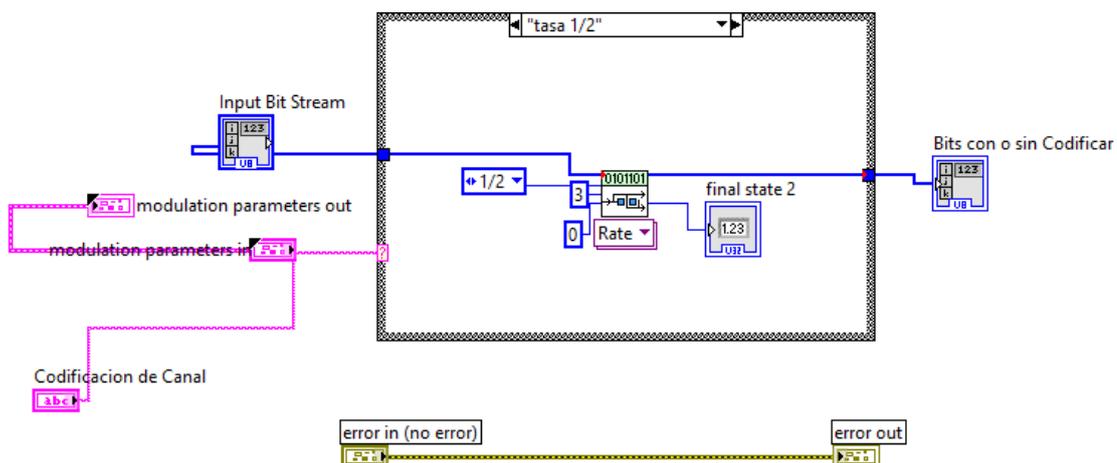
## ANEXO 11

## DIAGRAMA DE BLOQUE DEMODULADOR 16QAM EN LABVIEW



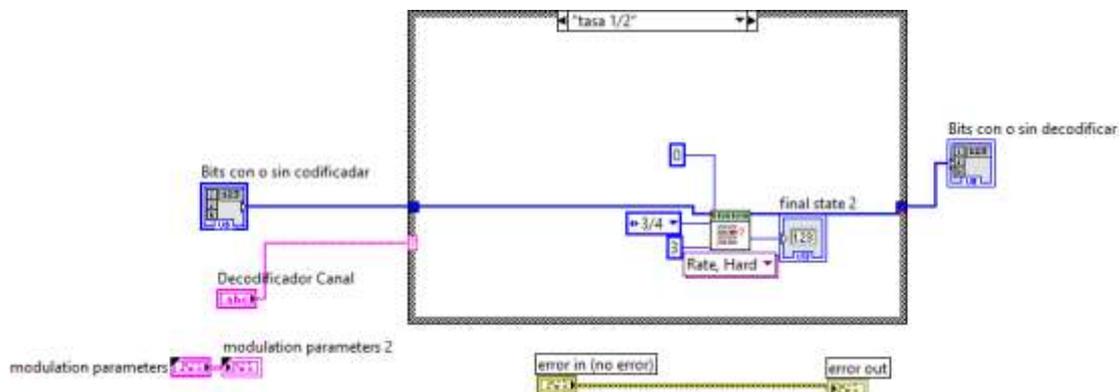
## ANEXO 12

## DIAGRAMA DE BLOQUE DE CODIFICADOR CONVOLUCIONAL EN LABVIEW



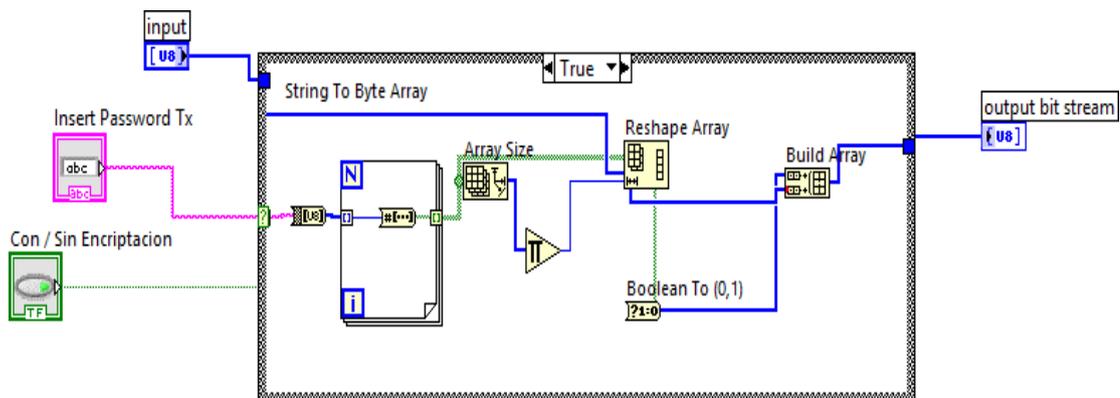
## ANEXO 13

### DIAGRAMA DE BLOQUE DE DECODIFICADOR CONVOLUCIONAL EN LABVIEW



## ANEXO 14

### DIAGRAMA DE BLOQUE DE ENCRIPTADOR EN LABVIEW



## ANEXO 15

## DIAGRAMA DE BLOQUE DE DESENCRIPTADOR EN LABVIEW

