



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**"Transmisión de audio y análisis de  
ecualizadores lineales en una sola portadora a  
través de canales multitrayectoria"**

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

Previa a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

**Ing. Ángel Steven Asanza Briones**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi grupo familiar conformado por, mis padres, mis hermanos, mi esposa y mi hijo, quienes no son nada más y nada menos que un solo conjunto: seres queridos quienes suponen benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de humano. No podría sentirme más agradecido con la confianza y apoyo puesta sobre mi persona.

Este nuevo éxito es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir un proyecto que en inicios podría parecer una tarea titánica e interminable.

Quisiera dedicar mi tesis a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor y bienestar.

Muchas gracias a mi familia que siempre guardo en mi alma

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas. Me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

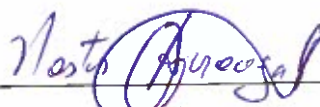
## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

Ph.D. Boris Ramos.

**EVALUADOR**



---

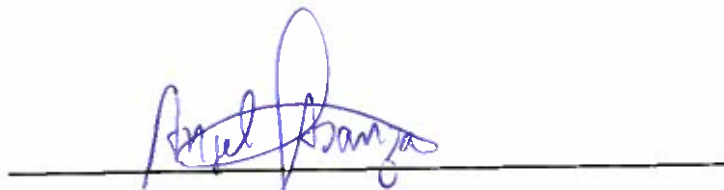
M.Sc. Nestor Arreaga.

**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.



Ing. Ángel Steven Asanza Briones

C.I.: 0927286567

## RESUMEN

El crecimiento sostenido del desarrollo de la tecnología mediante el uso de las comunicaciones inalámbricas cada vez es objeto y base de estudio para promover en estudiantes el desarrollo de modelos de comunicaciones reales y simuladas. El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre distintos ecualizadores lineales en canales multitrayectoria, variando en el modelo de comunicación parámetros como; modulación y secuencia de entrenamiento, ambos a ser desarrollados en un sistema inalámbrico, considerando factores adversos que influyen en la transmisión de audio mediante una sola portadora en un sistema digital utilizando el software LABVIEW y el hardware NI USRP-2920.

Previo al análisis comparativo a efectuarse, es fundamental revisar los siguientes conceptos (SNR, Ecualizadores, BER, filtro Wiener, secuencia de entrenamiento, Frank, Barker, código Huffman, Canales Indoor y Outdoor), los cuales constituyen los parámetros a ser implementados en el desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrico.

Con el fin de observar y verificar el funcionamiento de los algoritmos a desarrollar en el modelo digital inalámbrico, los ecualizadores serán sometidos a diferentes pruebas que simularán condiciones reales e inclusive poco viables para el sistema de comunicación que se utilizará en la transmisión de audio.

Finalmente, se aplicará la evaluación, comparación e interpretación explícita del comportamiento de las gráficas BER versus SNR de los ecualizadores, lo que permitirá determinar el medio idóneo para la transmisión de audio.

# CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	2
DEDICATORIA .....	3
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	4
DECLARACIÓN EXPRESA .....	5
RESUMEN .....	6
ABREVIATURAS .....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS .....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.....	13
2. TRANSMISION DE AUDIO .....	13
2.1 ALGORITMOS DE HUFFMAN.....	15
3. MODULACION DIGITAL .....	15
3.1 MODULACION QPSK (QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYING) .....	16
3.2 MODULACION 16 QAM (QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION) .....	17
4. CANALES INALAMBRICOS.....	18
4.1 PROPAGACIÓN EN CANALES MULTICAMINOS .....	19
4.2 ESTUDIO DE CANALES INALÁMBRICOS .....	19
5. IMPLEMENTACIÓN DE LA SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO FRANK Y BARKER.....	22
5.1 CODIGO DE BARKER.....	23
5.2 CODIGO DE FRANK GRAY .....	24
6. ECUALIZACION.....	25
6.1 SISTEMA DE ECUALIZACION DIRECTA.....	26
6.2 SISTEMA DE ECUALIZACION WIENER.....	29
7. RESULTADOS .....	32
A. Análisis de los ecualizadores a diferentes tipos de canales.....	33
B. Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes tipos de modulaciones .....	35
C. Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes secuencias de entrenamiento. ....	39
8. CONCLUSIONES.....	43
9. BIBLIOGRAFIA .....	45
10. ANEXOS .....	46

## ABREVIATURAS

<b>ISI</b>	Intersymbol interference
<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral
<b>DCT</b>	Discrete Cosine Transform
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>PSK</b>	Phase-ShiftKeying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>EW</b>	Ecualizador Wiener
<b>ED</b>	Ecualizador Directo
<b>R</b>	Real
<b>S</b>	Simulado
<b>B</b>	Secuencia de Entrenamiento Barker
<b>F</b>	Secuencia de Entrenamiento Frank
<b>RB</b>	Tasa de Bits



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 transmisión de audio .....	13
Figura 2 Modulación QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) .....	17
Figura 3 Modulación 16QAM (cuadrature amplitude modulation) .....	18
Figura 4 Propagación en canales multicaminos .....	19
Figura 5 Power Delay Profile (Indoor A) .....	21
Figura 6 Power Delay Profile (Indoor B) .....	21
Figura 7 Power Delay Profile (Outdoor A) .....	22
Figura 8 Power Delay Profile (Outdoor B) .....	22
Figura 9 Bloque de LabView del código Barker .....	23
Figura 10 Bloque de LabView del código Frank.....	25
Figura 11 Interferencia Intersimbólica .....	26
Figura 12 Sistema de ecualización Directa .....	27
Figura 13 Bloque de LabView del Ecualizador Directo .....	29
Figura 14 Filtro de Wiener .....	30
Figura 15 Bloque de LabView del Ecualizador Wiener .....	32
Figura 16 Ecualizador Directo: Real Versus Simulado .....	33
Figura 17 Ecualización Wiener: Real versus Simulado .....	34
Figura 18 Ecualizador: Directo versus Wiener con modulación 16 QAM.....	35
Figura 19 Ecualizador: Directo versus Wiener con modulación QPSK .....	38
Figura 20 Ecualizador: Directo real con modulación QPSK y 16 QAM .....	36
Figura 21 Ecualizador Directo simulado con modulación QPSK y 16 QAM.....	37
Figura 22 Ecualizador Wiener real con modulación QPSK y 16 QAM .....	38
Figura 23 Ecualizador Wiener simulado con modulación QPSK y 16 QAM.....	38
Figura 24 Secuencia de entrenamiento: Frank 18 versus Barker 7 con modulación 16 QAM....	41
Figura 25 Secuencia de entrenamiento: Frank 32 versus Barker 11 con modulación 16 QAM..	40
Figura 26 Secuencia de entrenamiento Frank 18 y Frank 32 con modulación QPSK.....	41
Figura 27 Secuencia de entrenamiento Barker 7 y Barker 11 con modulación QPSK.....	41
Figura 28 Tasa de Bits vs SNR del ecualizador Directo y Wiener .....	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Canales Indoor - Residenciales .....	20
Tabla 2 Canales Outdoor - Áreas Rurales .....	20
Tabla 3 Secuencias Barker .....	23

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas digitales para la transmisión de datos inalámbricos, han dado origen que se establezca una manera diferente de este tipo de comunicación, mediante el envío de ondas electromagnéticas cuyo medio es el espacio libre donde el equipo transmisor y receptor envía de forma analógica o digital lo que desea transmitir; texto, imagen, audio y video. Los sistemas digitales tienen una mayor ventaja que los sistemas analógicos, entre éstas se tienen; menor presencia de ruido con respecto a la señal análoga, mayor robustez en la señal, procesamiento multicanal con mayor número de señales digitales, fácil regeneración, medición y evaluación de la señal digital.

A pesar de las bondades antes anotadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos digitales, uno de los efectos no deseados en los sistemas de comunicación digital es la presencia del ruido y del ISI, lo que conlleva a implementar necesariamente filtros llamados ecualizadores para que las muestras obtenidas en el receptor se desvíen hasta los niveles ideales de la señal original.

Para señales de audio, la distorsión resultante tiene como consecuencia la pérdida del timbre de la voz original y, eventualmente el mensaje no es comprensible, lo que obliga a emplear técnicas para corregir esta situación y hacer que la atenuación sea la misma en todas las frecuencias de la banda. Una de las técnicas frecuentes utilizadas es la ecualización cuya función es predistorsionar la señal de modo que se compense la característica de atenuación del sistema.

Para el desarrollo de este estudio, se tomó como base las prácticas realizadas en el equipo USRP (universal software radio peripheral) a través del software LabVIEW, haciendo uso del manual Digital Wireless Communication Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP y EE49 Laboratory 1 SourceCoding, lo que a continuación se explyaya.

# 1. SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Los sistemas de comunicación inalámbricos, son sistemas no confinados donde el transmisor y el receptor no se conectan mediante un medio físico guiado haciendo uso de cables, sino que la transmisión de las ondas electromagnéticas se manifiestan mediante la modulación en sus extremos a través del aire.

La información que es transmitida a través de un sistema de comunicación digital se puede asegurar que siempre llegará al receptor adecuado. Las diferentes fuentes de información pueden ser unidas y transmitidas en un canal digital común, por tanto la fuente puede ser analógica como digital.

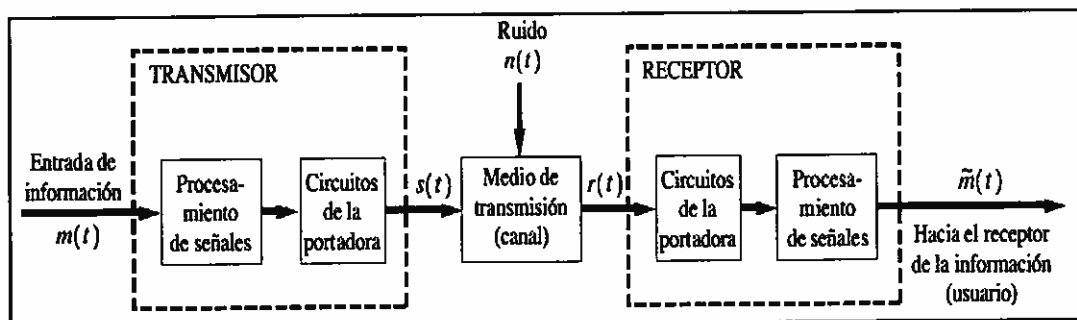


Figura 1 transmisión de audio

## 2. TRANSMISIÓN DE AUDIO

La transmisión de audio se inicia mediante la entrada de información (voz), donde la señal es preparada muestreándola, codificándola; haciendo uso de una cantidad mínima de bits los cuales se obtienen a través de los algoritmos Huffman o la transformada coseno discreta (DCT), proceso que consiste en asignar códigos binarios lo más cortos posibles a aquellos símbolos que ocurren con mayor frecuencia en los datos, posterior se multiplexa la señal y se

procede a enviarla por el transmisor. En el receptor se realizan todos los procesos aplicados en el transmisor pero de forma inversa, hasta llegar a reconstruir la señal inicial basándose en estimaciones, producto del muestreo aplicado

## 2.1 TRANSFORMADA DISCRETA DEL COSENO (DCT)

Representar una señal en el dominio de la frecuencia, es hablar de un método estándar para compresión. Usualmente, la señal de audio se encuentra en la parte inferior del intervalo de la frecuencia, lo que implica que para cumplir con el objetivo de comprimir la señal, se procede a redondear a cero los componentes de alta frecuencia, haciendo uso de la transformación discreta del Coseno (DCT), que permite la obtención de una señal de audio en el dominio de la frecuencia.

La transmisión de audio analizada, con lleva a aplicar las siguientes fórmulas estándar para el cálculo de la DCT:

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

La aplicación de la transformada discreta del coseno inverso es el proceso que permite rehacer un conglomerado de muestras a partir de un grupo de estimaciones de los coeficientes DCT, no desestimando en esta fase el tener pendiente los coeficientes DCT ignorados, por tanto, los coeficientes deben ser reemplazados por 0 y luego aplicar la DCT inversa sobre los estimados recibidos.

## **2.2 ALGORITMOS DE HUFFMAN**

La codificación Huffman es un algoritmo de compresión de datos sin pérdidas. La idea es asignar los códigos de longitud variable a los caracteres de entrada, las longitudes de los códigos asignados se basan en las frecuencias de los caracteres correspondientes. El carácter más frecuente obtiene el código más pequeño y el carácter menos frecuente obtiene el código más grande.

Los códigos de longitud variable asignados a los caracteres de entrada son códigos de prefijo, significa que los códigos (secuencias de bits) se asignan de tal manera que el código asignado a un carácter no es prefijo de código asignado a ningún otro carácter. Así es como el código de Huffman se asegura de que no haya ambigüedad al decodificar el flujo de bits generado.

## **3. MODULACION DIGITAL**

La modulación digital (o codificación de canal) es el proceso de convertir una secuencia de entrada de bits en una forma de onda adecuada para la transmisión a través de un canal de comunicación.

El paso a la modulación digital proporciona más capacidad de información, compatibilidad con los servicios de datos digitales, mayor seguridad de los datos, comunicaciones de mejor calidad y una disponibilidad del sistema más rápida [11].

El espectro de RF debe ser compartido, pero cada día hay más usuarios que se asignan al espectro, a medida que aumenta la demanda de servicios de comunicaciones.

Los esquemas de modulación digital tienen mayor capacidad para transmitir grandes cantidades de información que los esquemas de modulación analógica.

Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir.

### **3.1 MODULACION QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)**

En QPSK, el flujo de datos binarios se subdivide en pares de dos bits o dibits cada uno constituyendo un símbolo. Una de las cuatro fases igualmente espaciadas del soporte, tal como  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $315^\circ$ , se selecciona entonces de acuerdo con el valor del símbolo.

Puesto que una señal QPSK puede ser vista como la suma de dos señales BPSK en cuadratura, su espectro de potencia es similar al de sus constituyentes BPSK. Sin embargo, para la misma velocidad de datos global, la tasa de símbolo QPSK (dibit) sólo necesita ser la mitad de la velocidad de bits BPSK.



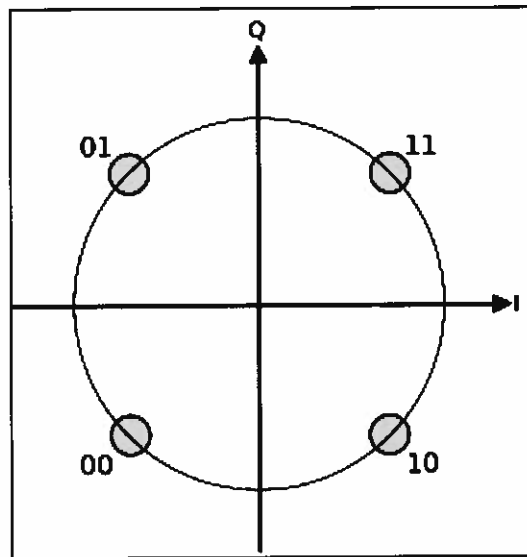


Figura 2. MODULACION QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

### 3.2 MODULACION 16 QAM (QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION)

Es una modulación digital avanzada que lleva datos que cambian la amplitud de dos ondas portadoras. La modulación QAM consiste en modular en amplitud (ASK) de forma independiente, dos portadores que tienen la misma frecuencia pero que están desfasadas entre sí  $90^\circ$ .

La señal modulada QAM es el resultado de sumar ambas señales ASK.

16-QAM (Modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados) Donde cada flujo de datos se divide en grupos de cuatro bits, y a su vez en subgrupos de 2 bits, codificando cada bit en 4 estados o niveles de amplitud de las portadoras [2].

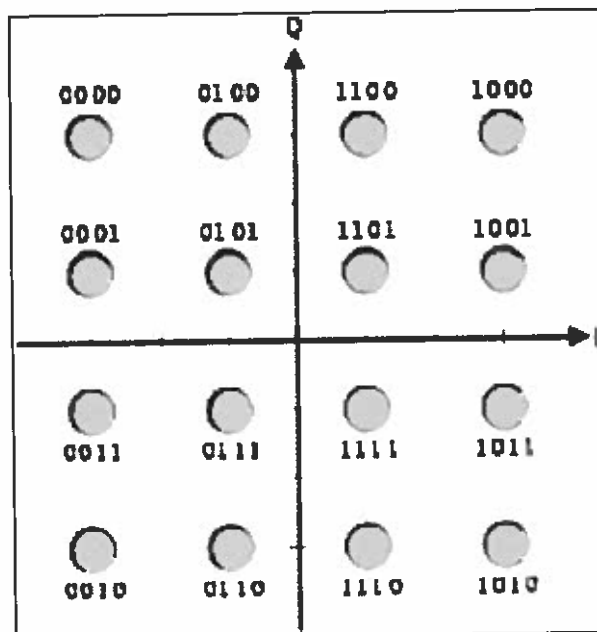


Figura 3. Modulación 16QAM  
(cuadratureamplitudemodulation)

## 4. CANALES INALÁMBRICOS

El medio para la propagación de la señal enviada por el transmisor y el receptor es el canal; uno de los factores que pueden degradar la transmisión por aire a través de éste, es el desvanecimiento selectivo, el cual en su trayectoria es impredecible lo que motiva a realizar estudios para modelar el canal de propagación de la señal [2].

## 4.1 PROPAGACIÓN EN CANALES MULTICAMINOS

Un canal multicamino es la afectación de la señal mediante los siguientes fenómenos como son; difracción, reflexión y dispersión, la cual provoca que la señal llegue a su destino por dos o más caminos en diferentes tiempos.

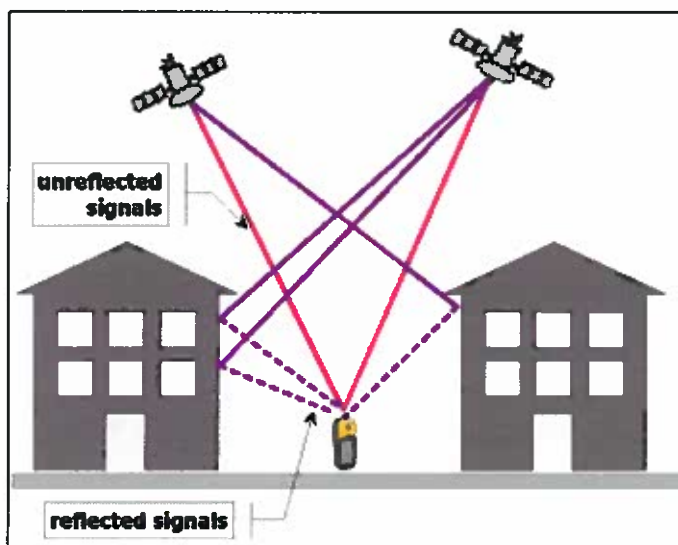


Figura 4 (propagación en canales multicaminos)

## 4.2 ESTUDIO DE CANALES INALÁMBRICOS

Las imágenes que a continuación se presentan, reflejan las particulares estimaciones que se realizarán para emular un sistema de comunicación inalámbrica con sus respectivas características y especificaciones, como tiempo y la potencia del pulso de los retardos, ver imágenes.

Tap	Canales A		Canales B	
	Delay (nsec)	AvgPower (dB)	Delay (nsec)	AvgPower (dB)
1	0	0	0	0
2	100	-13.8	100	-6.0
3			200	-11.9
4			300	-17.9

*Tabla 1. Canales Indoor - Residenciales*

Tap	Canales A		Canales B	
	Delay (usec)	AvgPower (dB)	Delay (usec)	AvgPower (dB)
1	0.0	0	0	0
2	0.2	-2.0	0.1	-4
3	0.4	-10.0	0.2	-8
4	0.6	-20.0	0.3	-12
5			0.4	-16
6			0.5	-20

*Tabla 2. Canales Outdoor - Áreas Rurales*

Contar con información de las propiedades de propagación de una señal en un medio o canal, permite predecir la forma de comportarse los sistemas de comunicaciones, ver perfil de potencias de retardos en relación a los canales antes descritos

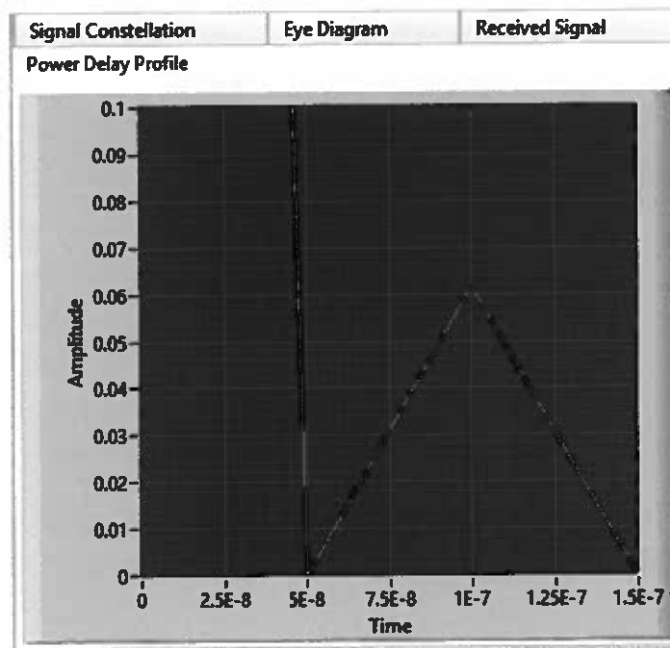


Figura 5. Power Delay Profile (Indoor A)

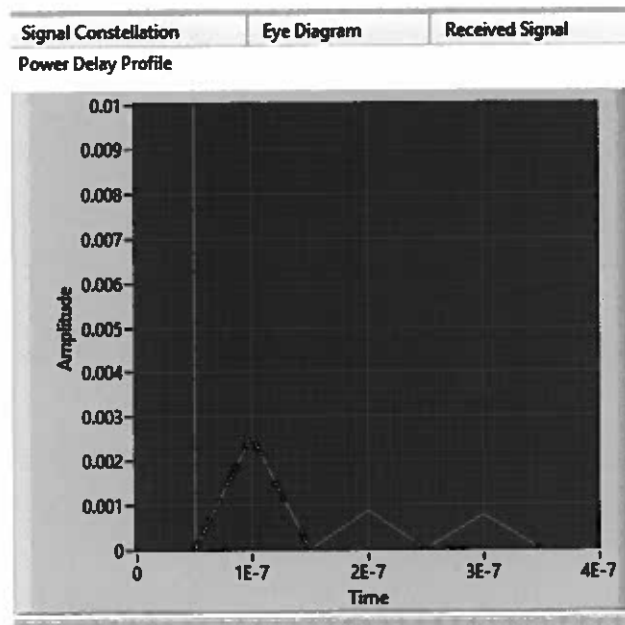


Figura 6. Power Delay Profile (Indoor A)

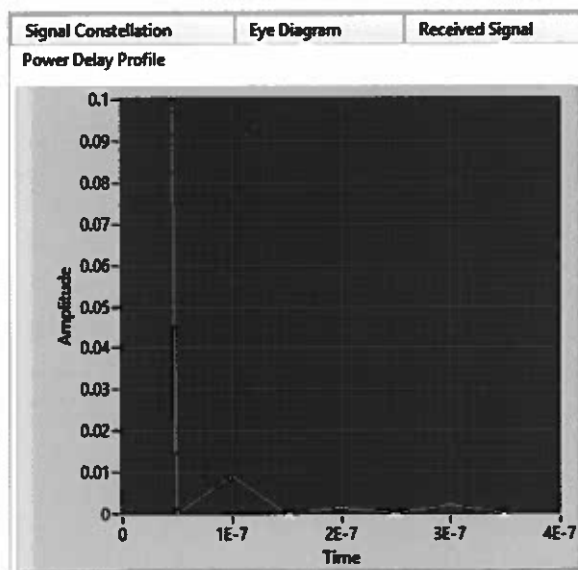


Figura 7. Power Delay Profile (Outdoor A)

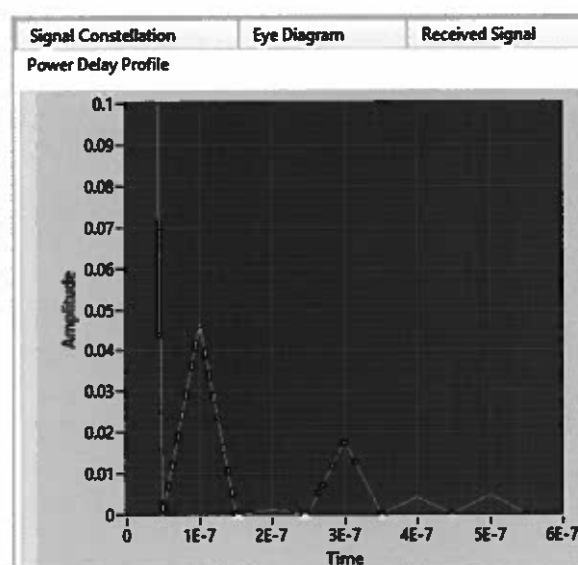


Figura 8. Power Delay Profile (Outdoor B)

## 5. IMPLEMENTACIÓN DE LA SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO FRANK Y BARKER

Posee propiedades de auto-correlación y correlación cruzada, mismas que son previamente declaradas en el transmisor y el receptor, siendo éstas insertadas al inicio de los datos que se modulan para obtener un estimado del canal y de los coeficientes del filtro, que serán usados en la sincronización de tramas y en otros fines en el receptor de este patrón de bits.

## 5.1 CÓDIGO DE BARKER

Una secuencia de Barker es una secuencia binaria de longitud finita con la autocorrelación aperiódica mínima posible. Actualmente, sólo existen siete secuencias conocidas de Barker y se ha conjeturado que éstas son las únicas secuencias de Barker que existen [3].

CodeLengt	BarkerSequence
2	[- +. - -]
3	[- - - +]
4	[- + - -, - + + +]
5	[- - - + -]
7	[- - - + + - +]
11	[- - - + + + - + - +]
13	[- - - - - + + - - + + -]

Tabla 3. Secuencias Barker [1].

En una secuencia Barker  $\{a_k\}_{k=1}^{N_t}$  de longitud  $N_t$  es una secuencia de valores  $\pm 1$ , tal que:

$$\left[ \sum_{i=1}^{N_t-k} a_{i+k} a_i \right] \leq 1$$

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente a la secuencia de entrenamiento Barker.

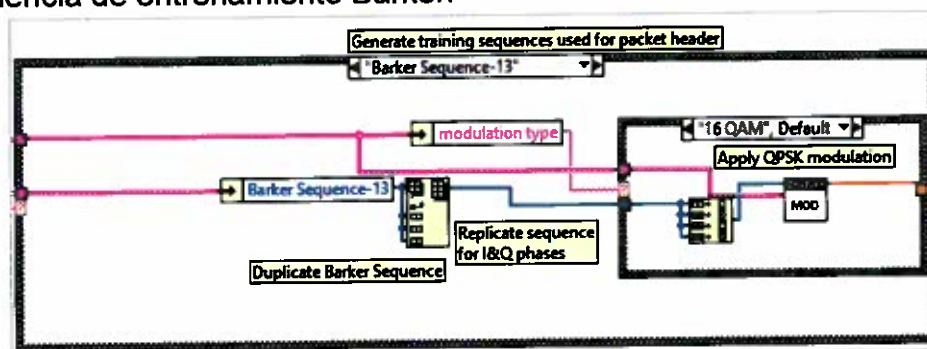


Figura 9. Bloque de LabView del código Barker

## 5.2 CÓDIGO DE FRANK GRAY

La presentación original de la patente de Frank Gray introdujo el código con respecto a una máscara de codificación para un barrido de haz de cátodo para eliminar errores debidos a la mecánica de barrido. En la patente, Gray se refirió al sistema de números binarios como binario convencional, para diferenciar su máscara de codificación de los empleados actualmente en ese momento.

Los códigos de impulsos eran el resultado de muestrear amplitudes de mensaje y agrupar los pulsos de encendido / apagado resultantes en una serie de grupos binarios. Gray se refiere al código como un código binario de n-dígitos porque los grupos pueden ser bits de 4, 5, 7 o cualquier número n. Con diferentes números de bits en un grupo y permutaciones de los bits, el código podría producir varias implementaciones. A continuación se muestra la secuencia Frank [7].

$$F = \{b^{(1)}, \dots, b^{(r)}, \dots, b^{(q-1)}\}$$

La secuencia Frank es una secuencia polifásico de longitud  $N = q^2$

$$b_n^{(r)} = b_{jq+k}^{(r)} = e^{\frac{i2\pi rkj}{q}}, 0 \leq k, j < q$$

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente a la secuencia de entrenamiento Frank.



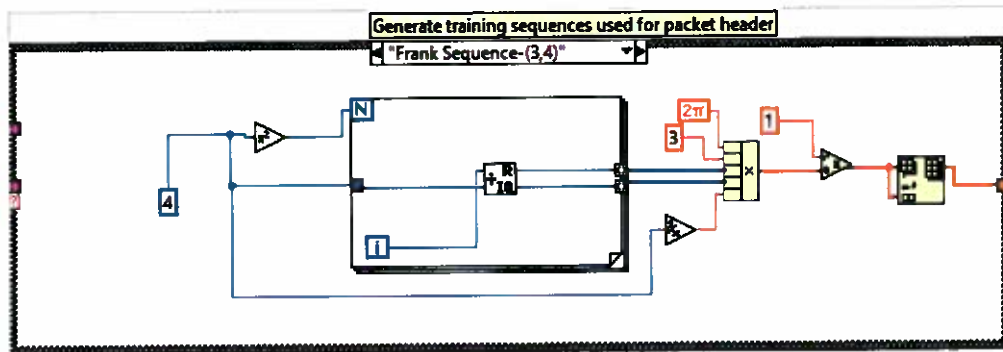


Figura 10. Bloque de LabView del código Frank

## 6.- ECUALIZACION

En el sistema de comunicación, el transmisor envía información a través de un canal de RF que distorsiona la señal de transmisión antes de que llegue al receptor. La ecualización es el proceso de recuperación de la secuencia de datos de las muestras de canal dañadas.

Un ecualizador es como un filtro que proporciona una compensación de la distorsión producida por el canal, que permite modificar la curva de respuesta de frecuencia de un sistema de audio.

La ecualización reduce la Interferencia entre Símbolos (ISI) tanto como sea posible para maximizar la probabilidad de decisiones correctas. La distorsión del canal surge en muchos sistemas de comunicación, esta aumenta en referencia a la compresión de la velocidad de datos en el tiempo o en el espacio dentro de un canal de ancho de banda fijo. Este fenómeno se denomina interferencia intersimbólica (ISI)[3].

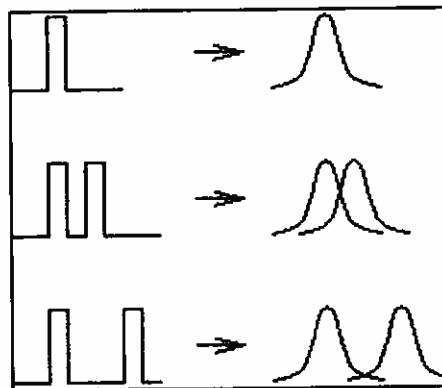


Figura 11. Interferencia Intersimbólica

ISI es una consecuencia inevitable de los sistemas de comunicación tanto cableados como inalámbricos que reducen la calidad de la señal recibida medida por la tasa de errores de bits (BER).

La demanda de altas velocidades de transmisión de datos ha aumentado la necesidad de técnicas de igualación para reducir los efectos del canal.

La ecualización del canal se utiliza para mejorar la calidad de la señal recibida en telecomunicaciones, especialmente en el sistema de comunicación digital [1].

### 6.1 SISTEMA DE ECUALIZACION DIRECTA

El sistema de ecualización directa, utiliza el filtro digital programable en el trayecto de la transmisión con el fin de lograr la ecualización previa al canal.

Sólo requiere una precisión correspondiente al número de niveles de señal. Los coeficientes de filtro se identifican durante el periodo de inicialización usando una secuencia de entrenamiento y se actualizan periódicamente

usando la misma secuencia de entrenamiento sin pasar por el filtro programable.

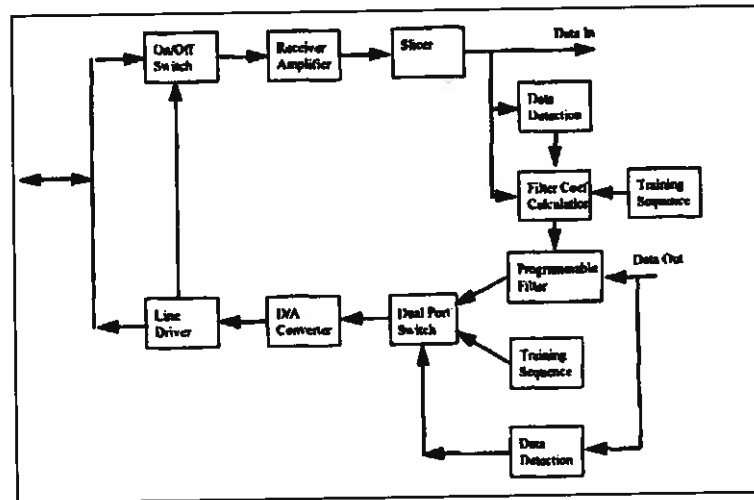


Figura 12. Sistema de ecualización Directa

Un canal adaptativo de velocidad en baudios sólo puede compensar la distorsión de canal en sus puntos de muestreo precisos. Por lo tanto, un receptor necesita un circuito de recuperación de la sincronización de trama para realizar un seguimiento de estos puntos de muestreo óptimos.

Es el que se obtiene su diseño a través de un aproximado de la secuencia recibida, sin dudar es más eficiente que hacer uso de técnicas como son las de estimación y ecualización, pues para resolver los problemas de estimación de mínimos cuadrados solo requiere que ésta sea resuelta.

Después de la ecualización lineal se debe considerar que la señal recibida tiene un retardo  $\eta_d$  como se muestra en la siguiente ilustración.

$$\hat{s}[n - n_d] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n - l]$$

En la siguiente suposición se prevé que  $s[n] = t[n]$  para  $n = 0, 1, \dots, N_t$  es la secuencia de entrenamiento comprendida. De tal manera  $\hat{s}[n - n_d] = t[n - n_d]$  para  $n = n_d, n_d + 1, \dots, n_d + N_t$ . Reformando la ecuación con la secuencia de entrenamiento conocida, se ilustra a continuación [10]:

$$t[n] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n + n_d - l]$$

Estructurando las ecuaciones lineales para  $n = 0, 1, \dots, N_t$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} t[0] \\ t[1] \\ \vdots \\ t[N_t - 1] \end{bmatrix}}_t = \underbrace{\begin{bmatrix} Y[n_d] & \dots & Y[n_d - L_f] \\ Y[n_d + 1] & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y[n_d + N_t - 1] & \dots & Y[n_d + N_t - L_f] \end{bmatrix}}_{Y_{n_d}} \underbrace{\begin{bmatrix} f_n[0] \\ f_n[1] \\ \vdots \\ f_n[L_f] \end{bmatrix}}_{f_{n_d}}$$

Como resultado supongamos que  $Y$  es de rango completo en presencia del ruido. La solución de los mínimos cuadrados es.

$$\hat{f}_{n_d} = (Y_{n_d} * Y_{n_d})^{-1} Y_{n_d} * t$$

El error cuadrático puede ser evaluado como:

$$J_f[n_d] = \|t - \hat{Y}_{n_d} \hat{f}_{n_d}\|^2$$

Con el objetivo que el error cuadrático medio disminuya la secuencia de entrenamiento debe ser mayor su longitud. El ecualizador Directo toma como

referencia los valores de la secuencia de entrenamiento para poder estimar el error [1].

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente al ecualizador Directo.

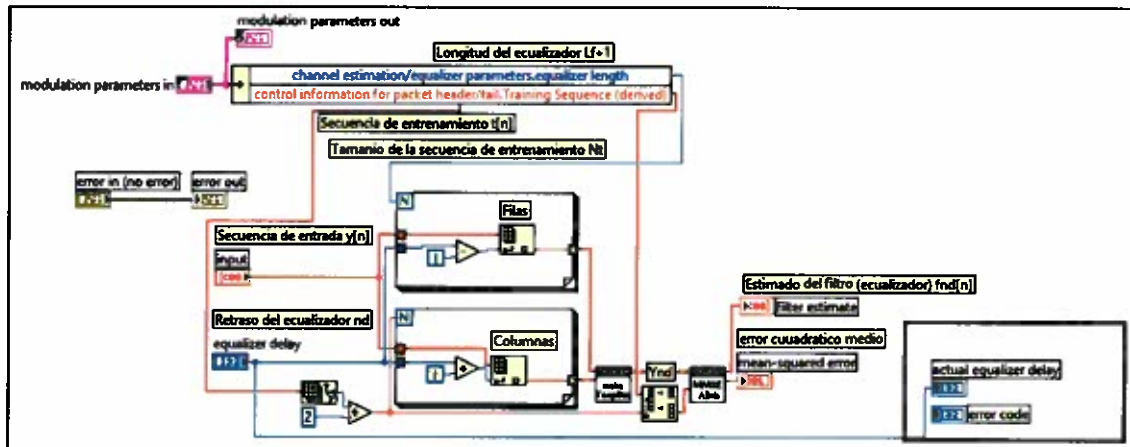


Figura 13. Bloque de LabView del Ecualizador Directo

## 6.2 SISTEMA DE ECUALIZACION WIENER

El filtro de Wiener es la técnica de filtrado propuesta por Norbert Wiener y publicada en 1949. La idea detrás del filtro de Wiener es reducir la cantidad de ruido presente en una señal comparándola con la señal silenciosa deseada.

En este método propuesto, primero se calcula el vector óptimo del peso del canal del filtro Wiener. El concepto básico detrás del filtro Wiener es minimizar la diferencia entre la salida del filtro y alguna salida deseada.

Esta minimización se basa en la aproximación de error cuadrático menos significativo que ajusta el coeficiente de filtro para reducir el cuadrado de la diferencia entre la forma de onda deseada y real después del filtrado.

Cuando una señal de entrada dañada es filtrada con el filtro de Wiener, proporciona la salida ponderada  $\hat{d}(n)$  [4].

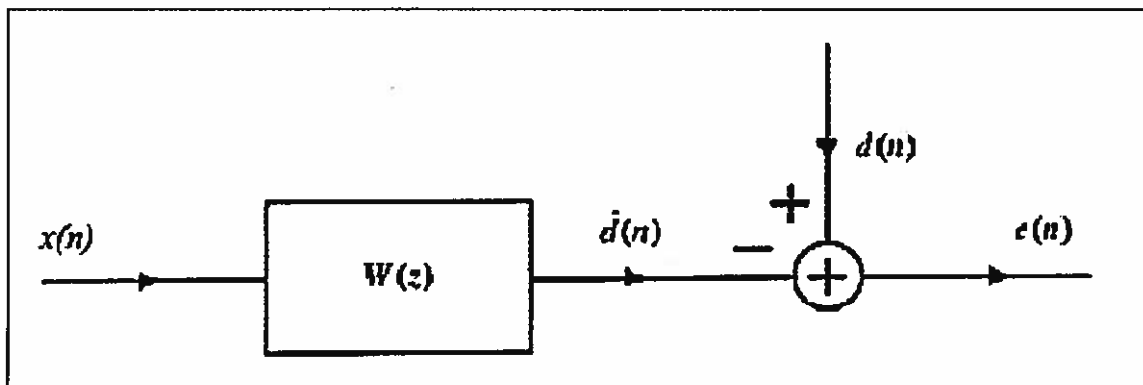


Figura 14. Filtro de Wiener

La señal  $\hat{d}(n)$  en la figura es la estimación de la señal verdadera  $d(n)$ . La señal  $e(n)$  es la señal de error que se modela como la diferencia entre la salida del filtro y la señal deseada [4].

El igualador o filtro Wiener es un ecualizador lineal preestablecido, tiene como objetivo solucionar el inconveniente de estimación de la señal a través de un proceso estadístico.

Para estimar la señal enviada en el transmisor se tiene como datos a evaluar la secuencia de entrenamiento como señal observada ( $Y_k$ ) y la señal estimada ( $S_k$ ), sus funciones de covarianzas conocidas  $R_s(k)$ ,  $R_y(k)$  y  $R_{sy}(k)$ . [9] Para evaluar  $S_k$  en función de  $Y_k$  se debe encontrar el MMSE lineal.

La siguiente imagen se considera un filtro Wiener de longitud  $N+1$ :

$$\hat{S}_k = \sum_{m=k-N}^k h_m Y_n = \sum_{i=0}^N h_i Y_{k-i}$$

Nosotros necesitamos encontrar los coeficientes  $h_i$  que minimicen el error cuadrático (MSE), para hacer esto se debe aplicar el principio de ortogonalidad.

$$E[(S_k - \hat{S}_k)Y_{k-j}] = 0; j = 0, 1, \dots, N$$

Como resultado obtenemos:

$$\sum_{i=0}^N h_i E[Y_{k-i}Y_{k-j}] = E(S_k Y_{k-j})$$

$$\sum_{i=0}^N h_i R_y(i-j) = R_{sy}(j)$$

Construyendo las ecuaciones lineales nos queda una matriz de tipo Toeplitz.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_y(0) & R_y(1) & \dots & R_y(N) \\ R_y(1) & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & R_y(1) \\ R_y(N) & \ddots & R_y(1) & R_y(0) \end{bmatrix}}_{R_y} \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix}}_h = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{sy}(0) \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{sy}(N) \end{bmatrix}}_{r_{sy}}$$

$$R_y h = r_{sy} \rightarrow h = R_y^{-1} r_{sy}$$

El sistema de ecuaciones son tipo Yule-Walker, donde  $R_y \geq 0$ . Ahora el Mínimo Error Cuadrático Medio puede ser más fácil calcular.

$$\begin{aligned} E[(S_k - \hat{S}_k)^2] &= E[(S_k - \hat{S}_k)(-S_k)] \\ &= E[(S_k - \hat{S}_k)(-S_k)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[(S_k - \hat{S}_k)^2] &= R_y(0) \\ &= R_y(0) - E[(S_k \hat{S}_k)] \end{aligned}$$

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = R_y(0) - h^T R_{sy}$$

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente al ecualizador Wiener.

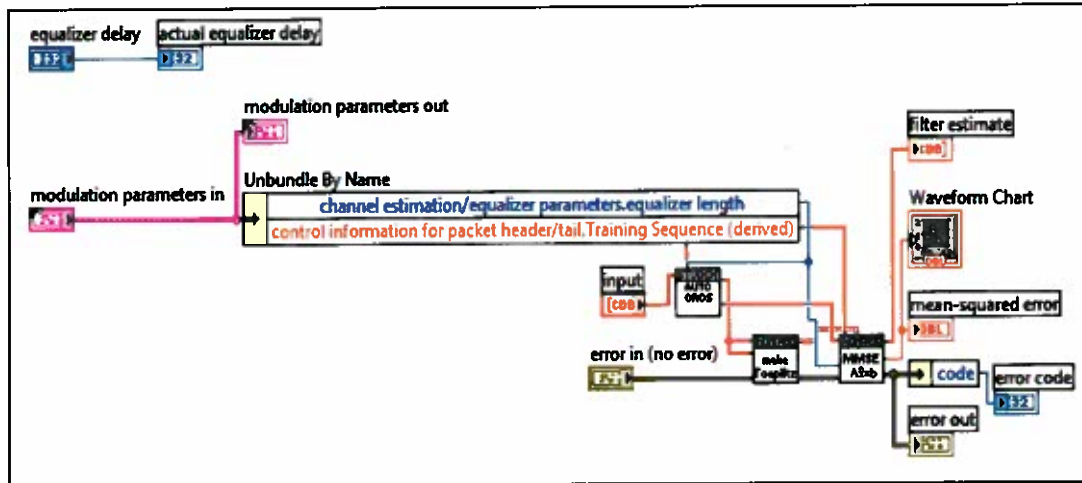


Fig. 15. Bloque de LabView del Ecualizador Wiener

## 7. RESULTADOS

Luego de implementar el sistema de comunicación digital se procedió a realizar unas pruebas de transmisión de audio pregrabado, con el fin, de poder observar cuáles son sus valores de SNR y BER en diferentes escenarios que se asemejen a los valores ideales de operatividad del sistema. Este tipo de recorrido de pruebas es una buena práctica para poder estimar el sistema con menor señal ruido e interferencia intersimbólica.

Visualización de las gráficas: con el objetivo de poder determinar con claridad los diferentes escenario de prueba, se procedió a nombrar los parámetros del sistema con la primera letra de una manera resumida por ejemplo; ecualizador Directo ED, ecualizador Wiener EW, simulado S, real R, Frank F, Barker B, Indoor a IA, Outdoor a OA.



## A. Análisis de los ecualizadores a diferentes tipos de canales.

Para desarrollar las simulaciones de los canales multitrayectoria correspondiente a los canales Indoor Residenciales y Outdoor Áreas Rurales se tomó como referencia los valores descritos en las Tablas 1 y 2, sección 4.2 de este trabajo.

La primera imagen demuestra mediante una gráfica logarítmica el comportamiento de los ecualizadores lineales por medio de la modulación QPSK. En la Figura 16 se desarrollará la implementación del sistema variando el canal y los mismos parámetros de secuencia de entrenamiento Barker 11, tasa de transmisión y recepción.

Nota: En todas las gráficas se evaluará el BER con respecto al SNR, se analizará la conducta de los gráficos, su tendencia, con los respectivos parámetros de la simulación.

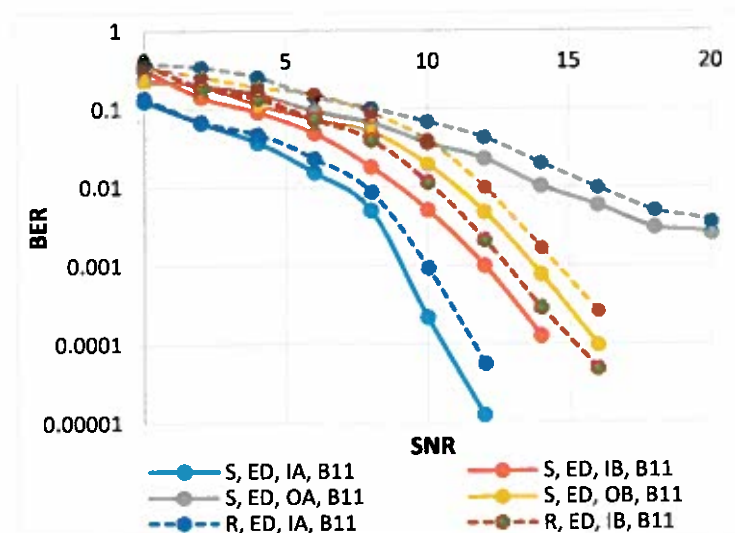


Figura 16. Ecualizador Directo: Real Versus Simulado

Como se muestra en las Figuras 16 y 17, los ecualizadores Directo y Wiener tienen un buen desempeño en los canales Indoor Residenciales, no obstante, se observa que tenemos una desviación de los valores ideales en los canales Outdoor.

En la Figura 16 se puede destacar que el ecualizador Directo tiene un mejor desempeño en la ecualización QPSK y 16 QAM en los canales simulados Indoor y Outdoor.

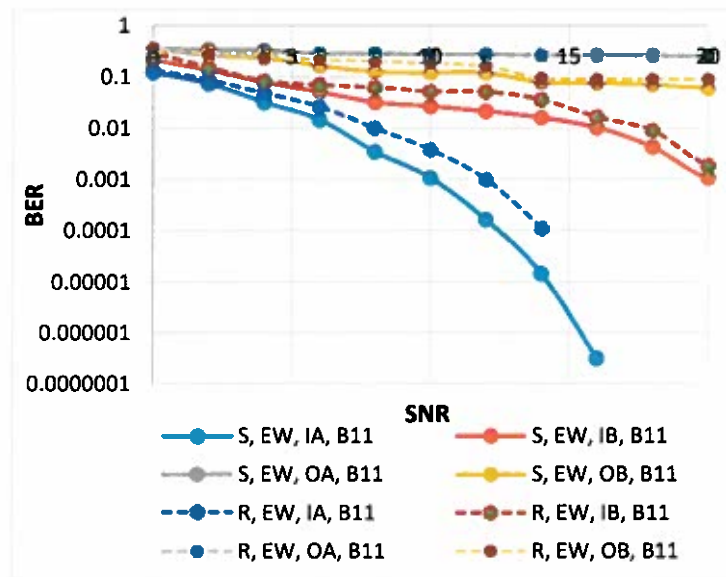


Figura 17. Ecuación Wiener: Real versus Simulado

Al realizar un comparativo entre las Figuras 17 y 18, se puede apreciar el desempeño de ambas, determinándose que el filtro Wiener correspondiente a la Figura 17 es el deseado; sin embargo la ecualización Directa representada por la Figura 18 posee una mejor estimación del canal en el receptor, cómo se puede evidenciar en el comportamiento de la curva.

La Figura 18 del ecualizador Wiener representa el buen desempeño de los canales Indoor A y B en la curva, versus los canales del Outdoor A y B los cuales no lo disponen por la gran cantidad de saltos multicamino que se reflejan.

## B. Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes tipos de modulaciones

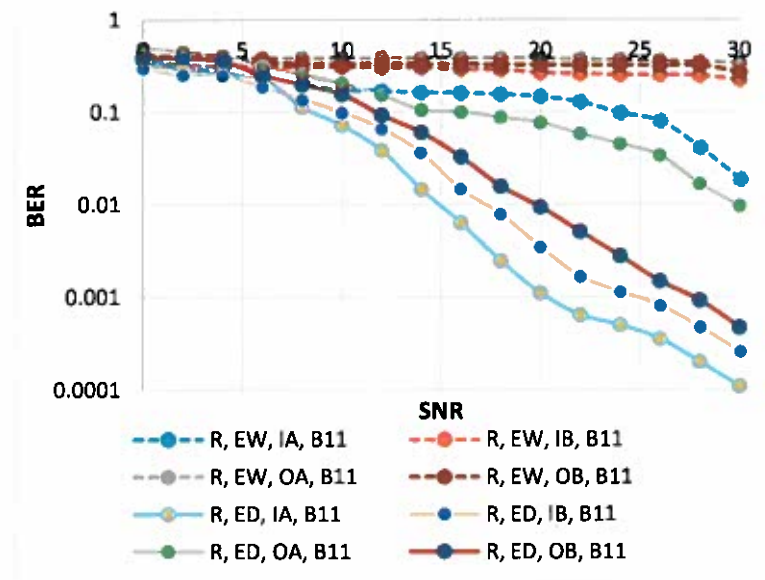


Figura 18. Ecualizador: Directo versus Wiener con modulación 16 QAM

La Figura 18, contiene los parámetros del sistema de comunicación, tales como Barker 11, Canal Multitrayectoria, Ecualización Directo y Wiener. La teoría de la modulación digitales 16 QAM, muestra mayor probabilidad ante el BER, situación que se origina porque su constelación cuenta con un amplio número de símbolos, siendo más susceptible al ruido y al ISI, ver Figuras 18 y 19 que evidencian el mejor desempeño contenido en la modulación QPSK, en razón de que sus curvas son las primeras en descender.

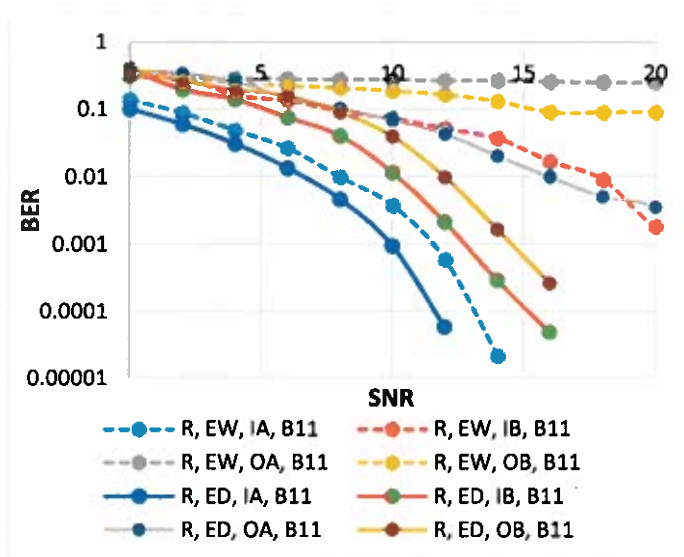


Figura 19. Ecuador: Directo versus Wiener con modulación QPSK

En la Figura 19, se visualiza una buena estimación de los canales Indoor A y B, implementados con la modulación QPSK.

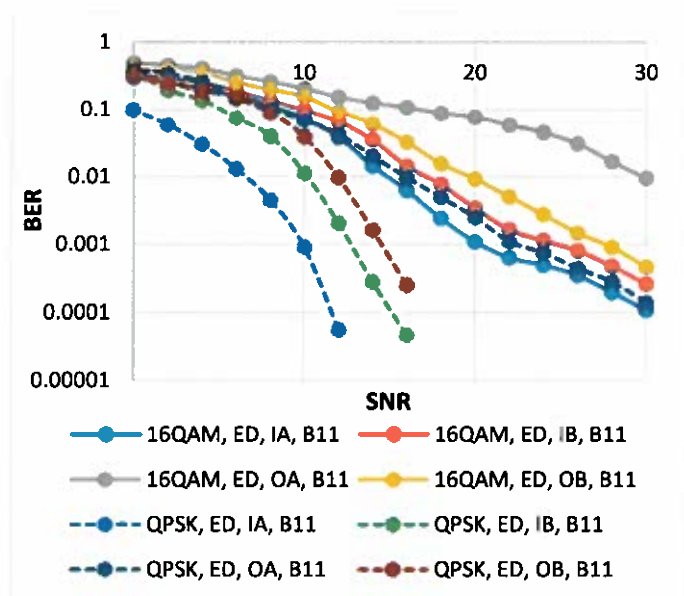


Figura 20. Ecuador: Directo real con modulación QPSK y 16 QAM

El canal Outdoor A, presenta mayores tiempos de retardo y saltos en sus parámetros de implementación; la Figura 20 demuestra lo expuesto.

De acuerdo a la figura en mención se evidencia que el ecualizador Directo no

tiene un buen desempeño aplicando la modulación 16 QAM.

En relación a las figuras antes expuestas, se puede definir que el ecualizador Directo tiene un rendimiento óptimo aplicando la modulación QPSK especialmente en los canales Indoor A, exceptuando su deficiencia al modular con 16 QAM en los canales Outdoor A y B, donde existe aumento del tiempo de retardo y mayor interferencia intersimbólica.

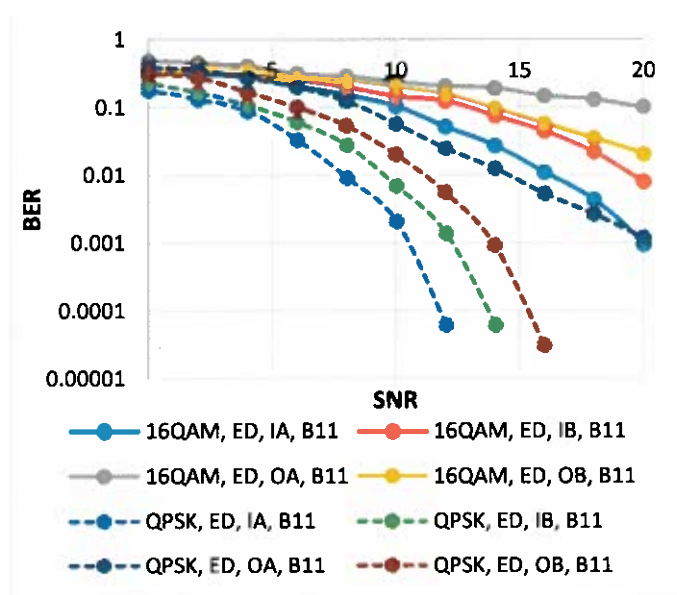


Figura 21. Ecualizador Directo simulado con modulación QPSK y 16 QAM

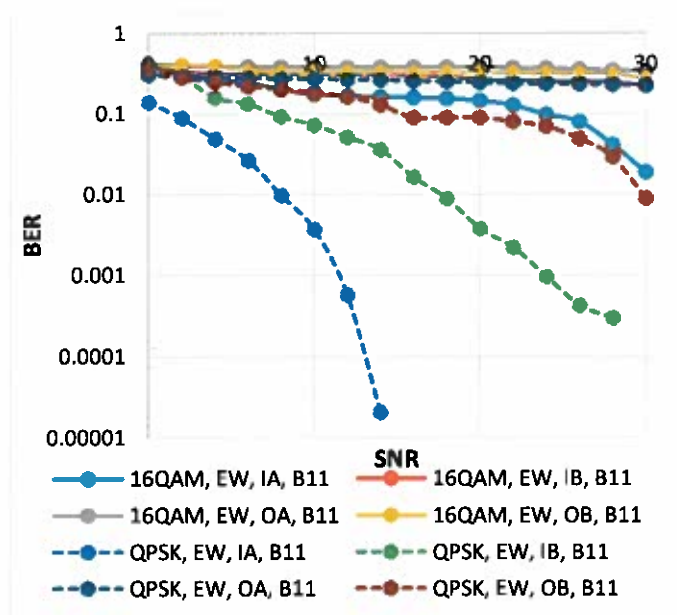


Figura 22. Ecualizador Wiener real con modulación QPSK y 16 QAM

Teniendo como referencia las Figuras 22 y 23, tanto el ecualizador Directo como el ecualizador Wiener, ambos permiten trabajar en un escenario simulado y real, presentando una buena interacción en la modulación QPSK, lo que no es factible en canales Outdoor modulando el sistema con 16 QAM. Por lo tanto, se puede concluir que el ecualizador Wiener tiene una mejor respuesta para canales Indoor A con modulación QPSK, mientras que en 16 QAM no existe un buen desempeño.

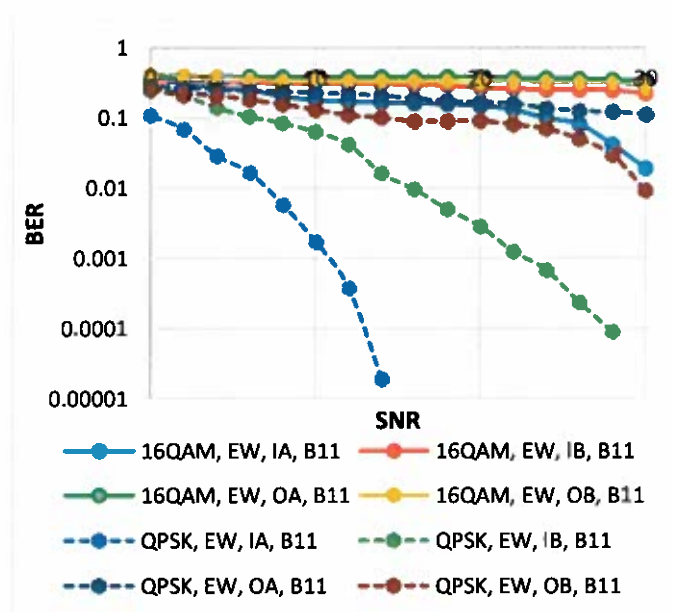


Figura 23. Ecualizador Wiener simulado con modulación QPSK y 16 QAM

La Figura 23, describe que la modulación 16 QAM presenta una buena estimación en el canal Indoor A, con menor interferencia intersimbólica.

### C. Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes secuencias de entrenamiento.

Para un correcto funcionamiento de un sistema de comunicaciones digitales se

debe tomar como referencia la secuencia de entrenamiento, su implementación ayuda en la estimación del ecualizador y la sincronización de la trama. Como tema de estudio y análisis, se realizará las pruebas implementando los ecualizadores con diferentes secuencias de entrenamiento.

Posteriormente se observará el comportamiento del ecualizador, variando las secuencias de entrenamiento, lo que permitirá una mejor obtención de sus coeficientes.

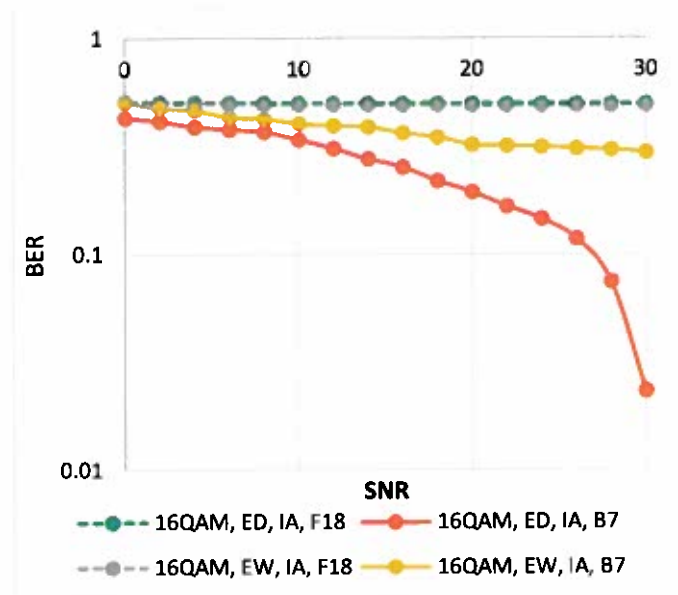


Figura 24. Secuencia de entrenamiento: Frank 18 versus Barker 7 con modulación 16 QAM

En la Figura 24 se ilustra la secuencia de entrenamiento Barker 7 con una buena estimación del ecualizador Directo, mientras que en el ecualizador Wiener no se presenta los mismos resultados, debido a su baja estimación.

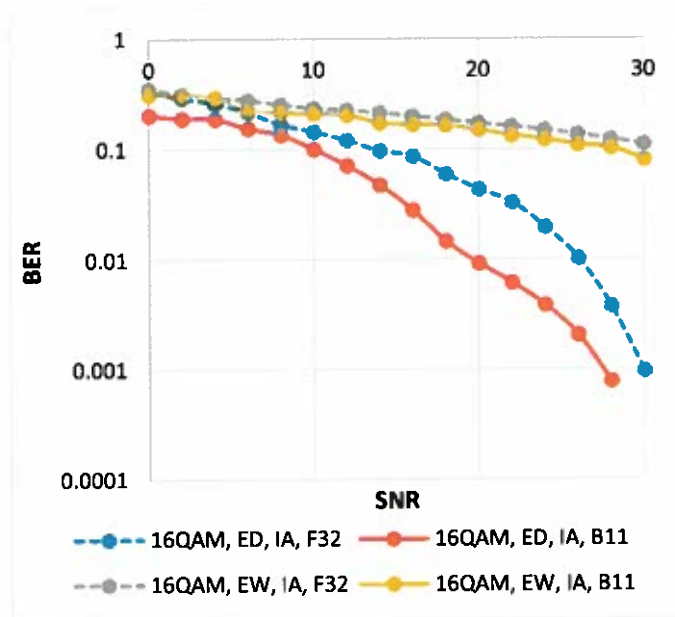


Figura 25. Secuencia de entrenamiento: Frank 32 versus Barker 11 con modulación 16 QAM

Nótese que en la Figura 26, Frank 18 no realiza una buena correlación de los datos, mientras que Frank 32 la supera en la respuesta del canal, al tener un mayor número en la secuencia de entrenamiento.

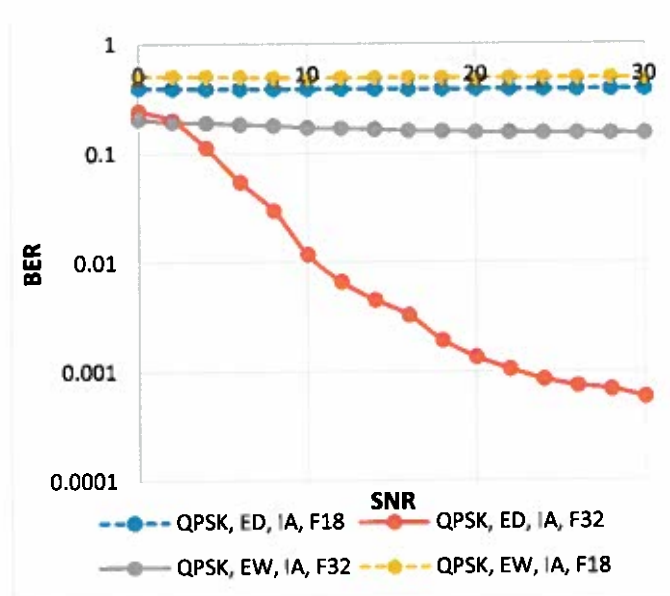


Figura 26. Secuencia de entrenamiento Frank 18 y Frank 32 con modulación QPSK

En la Figura 26 se puede apreciar la mejora en la tendencia de respuesta del ecualizador Directo al aumentar la secuencia de entrenamiento mientras que



en el proceso de ecualización Wiener no presenta un buen desempeño en las curvas.

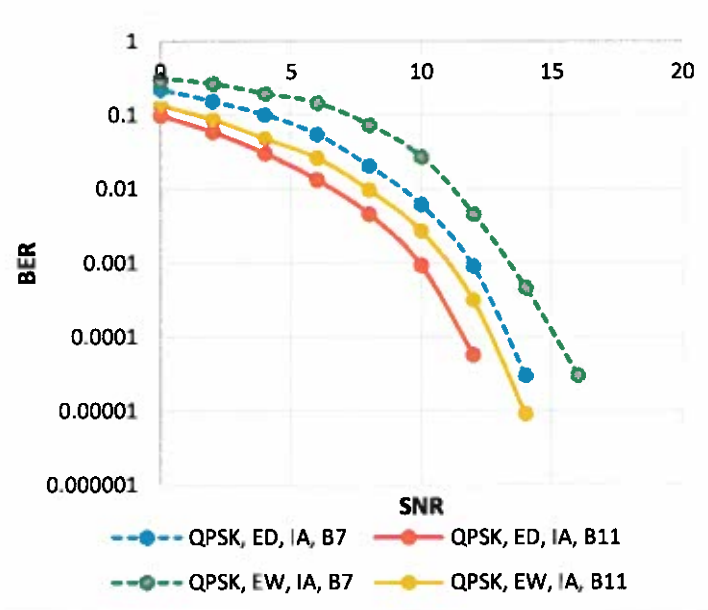


Figura 27. Secuencia de entrenamiento Barker 7 y Barker 11 con modulación QPSK

La Figura 27 describe la robustez al ruido en la secuencia de entrenamiento Barker 7 y 11, destacándose que existe una superioridad cuando se implementa Barker 11 respecto a Barker 7.

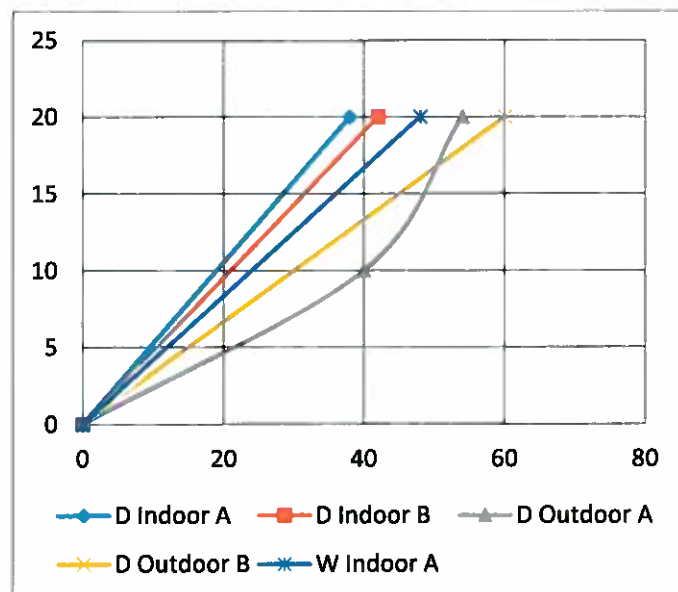


Figura 28. Tasa de Bits vs SNR del ecualizador Directo y Wiener

La Figura 28, indica que la tasa de bits aumenta en relación al crecimiento del SNR (relación señal ruido), lo que permite establecer que el mejor sistema es aquel que envía la mayor RB con un SNR menor, siendo este sistema el canal Indoor A.

## 8. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en los diferentes escenarios podemos concluir lo siguiente:

En los sistemas de comunicaciones inalámbricos con canales multipaso, se puede observar que la probabilidad de error aumenta en los canales Outdoor debido a que éstos tienen una mayor cantidad de pasos o trayectorias lo que provoca una mayor interferencia.

La modulación QPSK en el sistema propuesto transmite 2 bits mientras que la modulación 16 QAM transmite 4 bits, lo que permite concluir que 16 QAM transmite una mayor tasa de bits comparado con QPSK. La modulación 16 QAM por contar con mayor número símbolos en su constelación es más propensa al efecto del ISI; por lo que, en la transmisión de audio se debe considerar el aplicar robustez en la implementación de los sistemas de transmisión inalámbrica a través QPSK, mismo que tiene menor susceptibilidad a los efectos de la interferencia intersimbólica

En el análisis efectuado se determinó que el ecualizador Directo tiene un mejor desempeño generando una menor tasa de error mientras que el ecualizador Wiener plantea un enfoque estadístico que consiste en aplicar el método de autocorrelación y correlación cruzada. El filtro Wiener requiere de dos señales, observada y la deseada para aplicar el método estadístico del error cuadrático medio, mientras que el ecualizador Directo realiza su estimación directamente de la secuencia de entrenamiento y de la señal observada.

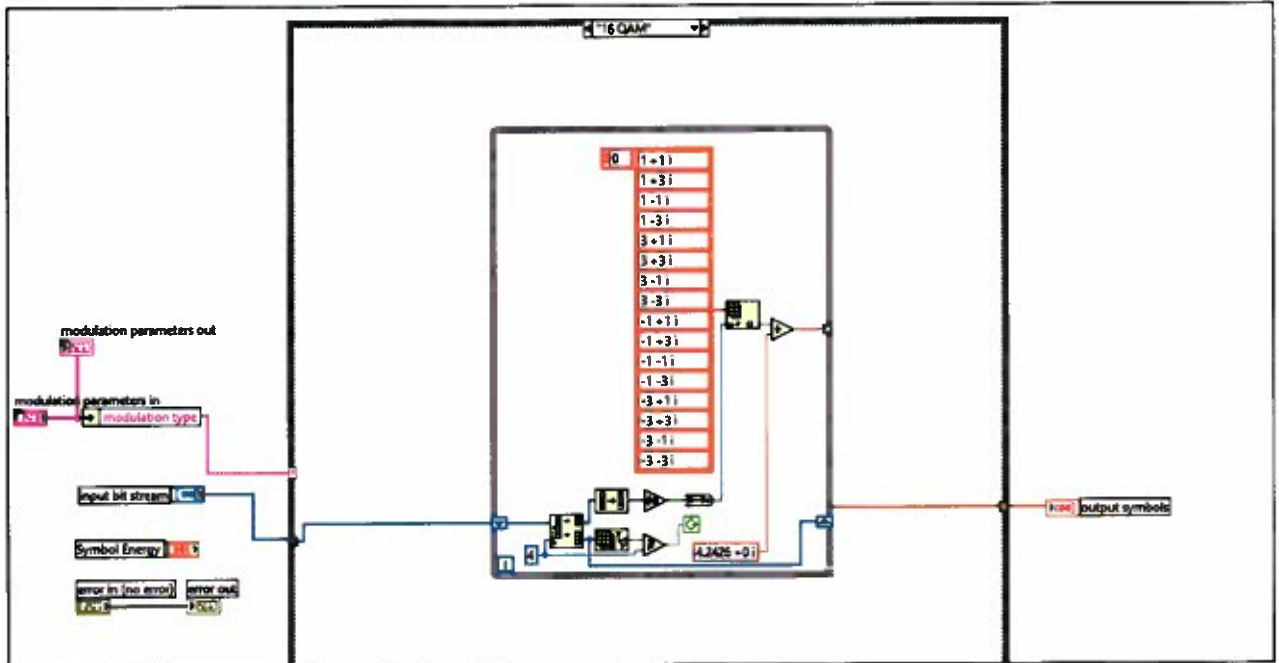
En las combinaciones de los sistemas propuestos, se puede considerar que la secuencia de entrenamiento Barker 7 y 11, poseen mayores propiedades de correlación que la secuencia de entrenamiento de Frank para la estimación del error cuadrático medio. Se puede evidenciar que al aumentar el tamaño de la secuencia de entrenamiento mejoró la respuesta del ecualizador, no obstante no se puede asegurar que a mayor tamaño se obtendrá un mejor resultado, puesto que si presenta mayor desplazamiento de frecuencias las propiedades de auto correlación pueden fallar.

## 9. BIBLIOGRAFIA

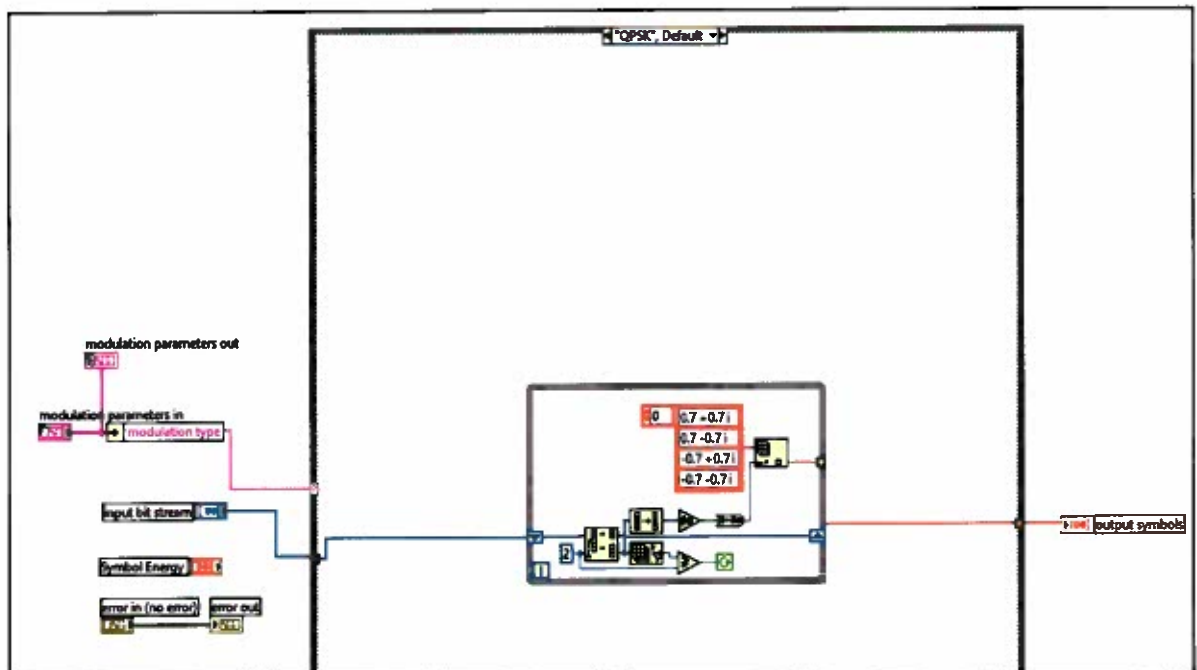
- (1) Robert w. Heat Jr. Ph.D., PE. "Digital Communications Physical Layer Lab using the NI USRP Platform", National Technology and Science Press
- (2) Gallager, R. (2006). Principles of Digital Communications I. En R. Gallager, *Principles of Digital Communications I* (págs. 168-180). massachusetts.
- (3) Haykin, S. (2012). *COMUNICATIONS SYSTEM 4ta edition*. toronto.
- (4) Introduction, D. M.–A. (s.f.).
- (5) Leon W. Couch, I. (s.f.). *Sistema de Comunicación digital y analogicos*. Gainesville: Universidad de Florida .
- (6) Martin Probst, L. T. (s.f.). Bit and Frame Synchronization. *Communication Networks Seminar*.
- (7) Puig, P. M. (s.f.). *Electronica de comunicaciones*. España: FUOC.
- (8) Virendra Singh Chaudhary, M. S. (2013). Channel Equalization using Weiner filter. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Volume No.2*.
- (9) Walter Y. Chen Texas Instruments, Inc. DSP R&D Center. (August 19-20, 1996.). A DIRECT EQUALIZATION METHOD. En W. Y. Chen.
- (10) Yellepeddi, A. (s.f.). Direct-Form Adaptive Equalization for underwater Acoustic Communication. *2010*.
- (11) conway, A. (2012). *Improved broadband noise filter for audio signals* . California .

## 10. ANEXOS

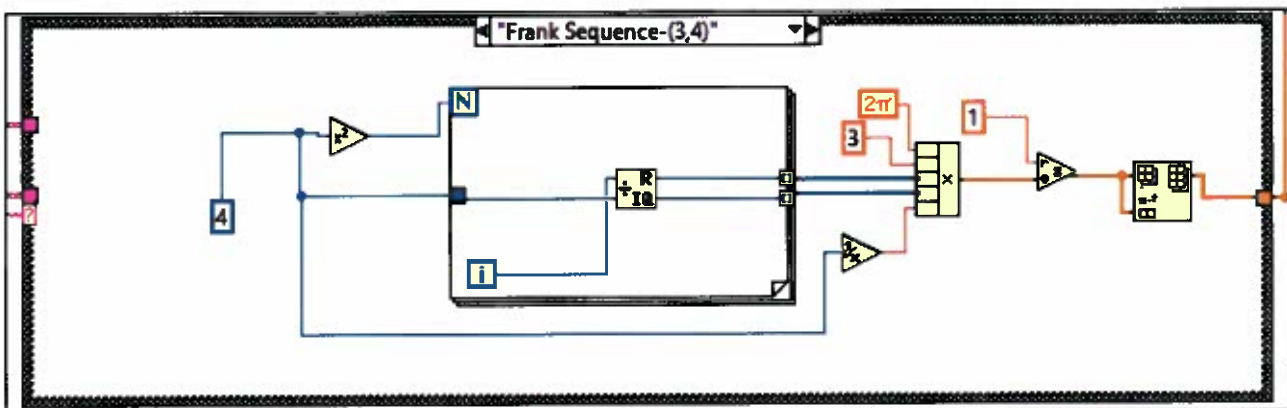
### Modulación 16 QAM



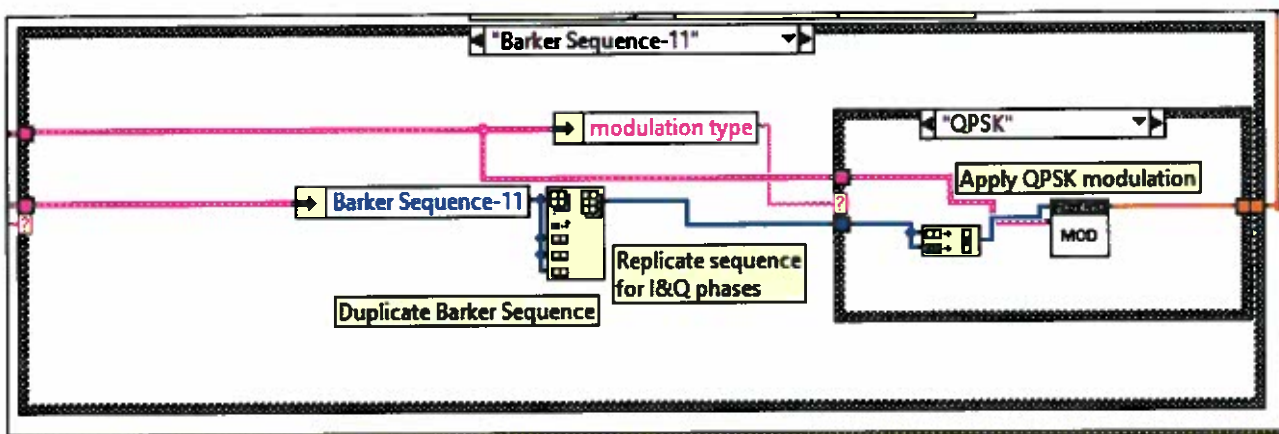
### Modulación QPSK



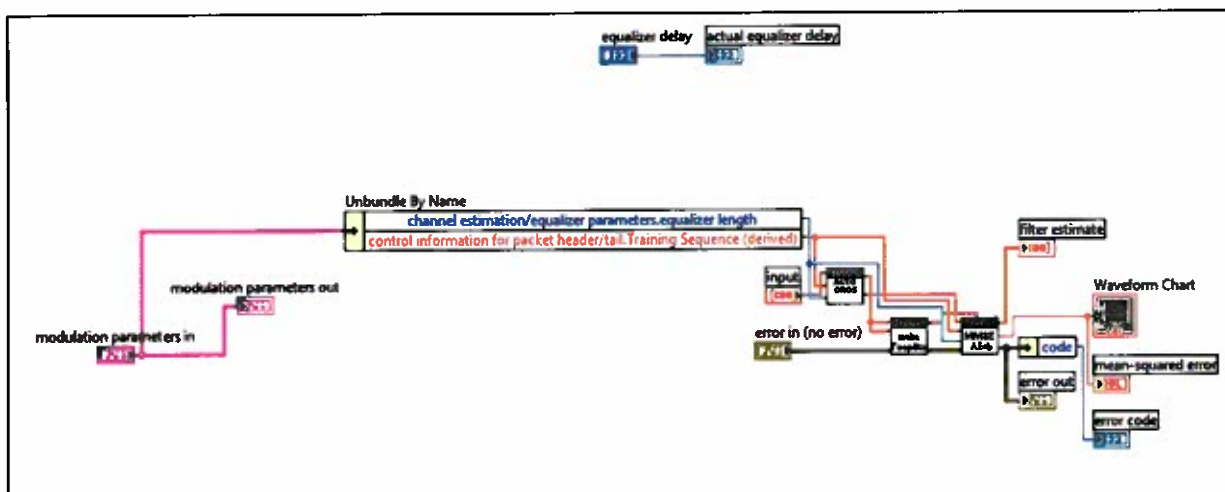
### Secuencia de entrenamiento Frank



### Secuencia de entrenamiento Barker



### Ecuadorador Wiener



## Ecuador Directo

