



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ECUALIZADORES LINEALES  
EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO DE  
TRANSMISIÓN DE AUDIO DE UNA SOLA PORTADORA”**

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

Previa a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

**Ing. David Fernando Valarezo León**

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2016

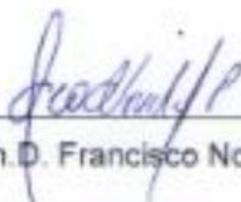
## **AGRADECIMIENTOS**

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 y su capacidad para guiar mis ideas, ha sido un aporte invaluable en el desarrollo de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro alcanzado de forma especial a Dios, a mi madre Albania León, a mi abuela Aída Gómez y a mi hermano Ángel Valarezo, por siempre estar conmigo y ser los pilares fundamentales de mi vida.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

Ph.D. Francisco Novillo

**EVALUADOR**



---

M.Sc. Vladimir Sánchez.

**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.



David Valarezo León

C.I.: 0704877273

## RESUMEN

El siguiente proyecto consiste en la implementación, diseño y simulación de un sistema digital de comunicación inalámbrico de una sola portadora para la transmisión de audio. Con el fin de realizar un análisis comparativo entre ecualizadores lineales con ayuda del software LABVIEW y el hardware NI USRP-2920.

Para esto, analizamos el comportamiento de las gráficas BER VS SNR de los ecualizadores a través de diferentes niveles de ruido, modelamiento de canales multipasos, modulaciones y secuencias de entrenamiento. Con el objetivo de estudiar como dichos factores afectan la comunicación de audio y establecer o ayudar en la elección de un sistema más óptimo para la transmisión de audio de forma inalámbrica.

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	III
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	IV
<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>1. MARCO TEORICO</b> .....	13
1.1. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS .....	13
1.2. TRANSMISIÓN DE AUDIO .....	15
1.2.1. La transformada discreta del coseno (DCT) .....	17
1.2.2. Algoritmos de Huffman.....	18
1.3. MODULACIÓN DIGITAL .....	19
1.3.1. QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying).....	19
1.3.2. 16-QAM (Cuadrature Amplitude Modulation).....	20
1.4. CANALES INALÁMBRICOS.....	21
1.4.1. Canales multicaminos .....	21
1.4.2. Canales Inalámbricos que se van a estudiar .....	21
1.5. SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO.....	22
1.5.1. Código Barker.....	23
1.5.2. Códigos Gold .....	23
1.6. SINCRONIZACIÓN DE TRAMA.....	25
1.7. ECUALIZACIÓN.....	26
1.7.1. Ecualizador Directo .....	26
1.7.2. Ecualizador Wiener .....	28
<b>2. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....	31

2.1. Respuestas Impulso de los diferentes tipos de canales .....	32
2.2. Respuestas de los ecualizadores a diferentes tipos de canales .....	35
2.3. Respuestas de los ecualizadores a diferentes tipos de modulaciones .....	38
2.4. Respuestas de los ecualizadores a diferentes secuencias de entrenamiento. ....	42
2.5. Tolerancia al ruido del sistema.....	46
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>51</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>53</b>

## ABREVIATURAS

<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>B</b>	Secuencia de entrenamiento Gold
<b>D</b>	Ecualizador Directo
<b>DCT</b>	Transformada del Coseno Discreto
<b>G</b>	Secuencia de entrenamiento Barker
<b>IA</b>	Indoor A
<b>IB</b>	Indoor B
<b>IDCT</b>	Transformada Inversa del Coseno Discreto
<b>ISI</b>	Interferencia Intersimbólica
<b>MMSE</b>	Error Cuadrático Promedio Mínimo
<b>MSE</b>	Error Cuadrático Promedio
<b>OA</b>	Outdoor A
<b>OB</b>	Outdoor B
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>S</b>	Simulado
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral
<b>W</b>	Ecualizador Wiener

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Elementos de un sistema de comunicaciones digital. ....	14
Fig. 2. Diagrama de bloque del procesamiento de la señal de audio. ....	15
Fig. 3. Señal muestreada en el transmisor. ....	16
Fig. 4. Señal muestreada en el receptor. ....	16
Fig. 5. Constelación de la Modulación QPSK. ....	19
Fig. 6. Constelación de la Modulación 16-QAM. ....	20
Fig. 7. Generador de secuencias Gold. ....	24
Fig. 8. Equipos del sistema de comunicación implementado para el ambiente de pruebas. ....	31
Fig. 9. Perfil de potencia de retardos del canal Indoor A. ....	32
Fig. 10. Perfil de potencia de retardos del canal Indoor B. ....	33
Fig. 11. Perfil de potencia de retardos del canal Outdoor A. ....	34
Fig. 12. Perfil de potencia de retardos del canal Outdoor A. ....	34
Fig. 13. BER vs SNR del ecualizador Directo en canales indoor y outdoor, modulación QPSK. ....	36
Fig. 14. BER vs SNR del ecualizador Wiener en canales indoor y outdoor, modulación QPSK. ....	36
Fig. 15. BER vs SNR de los ecualizadores Directo y Wiener en diferentes canales indoor y outdoor, modulación 16-QAM. ....	37
Fig. 16. BER vs SNR de los ecualizadores Directo y Wiener simulados en canales indoor y outdoor, modulación QPSK. ....	38
Fig. 17. BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM. ....	39
Fig. 18. BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM Simulados. ....	40
Fig. 19. BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM. ....	41
Fig. 20. BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM. ....	41
Fig. 21. BER vs SNR de los ecualizadores lineales con secuencia de entrenamiento Gold 15 y Barker 13. ....	43

Fig. 22. BER vs SNR de los ecualizadores lineales con secuencia de entrenamiento Gold 7 y Barker 7.....	43
Fig. 23. BER vs SNR del ecualizador Directo y Wiener con diferentes tamaños de la secuencia de entrenamiento Gold.....	44
Fig. 24. BER vs SNR del ecualizador Directo y Wiener con diferentes tamaños de la secuencia de entrenamiento Barker.....	45
Fig. 25. Rb vs SNR del ecualizador Directo y Wiener. ....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Canales Outdoor - Áreas Rurales.....	22
Tabla 2. Canales Indoor - Residenciales.....	22
Tabla 3. Secuencias Barker .....	23
Tabla 4. Secuencias Gold Obtenidas . .....	25

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas comunicación digital es un pilar fundamental de la comunicación inalámbrica, gracias a la digitalización es posible utilizar técnicas de procesamiento de señal que ofrecen nuevas funcionalidades que los sistemas analógicos no resuelven de forma satisfactoria.

Los sistemas de comunicación digitales pueden proporcionar una mayor calidad que los sistemas analógicos, mayor seguridad, mejor robustez al ruido y una fácil integración de diferentes tipos de fuentes, por ejemplo, texto, imagen, voz y video.

En todos los sistemas inalámbricos existen distorsiones en la señal transmitida debido a los efectos del canal de propagación, por tal motivo es de suma importancia el estudio del efecto de un sistema de ecualización, ya que su función es de compensar las deficiencias del canal de transmisión.

Para realizar este proyecto se basó en las prácticas del manual Digital Wireless Communication Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP y EE49 Laboratory 1 Source Coding. [1] [2]

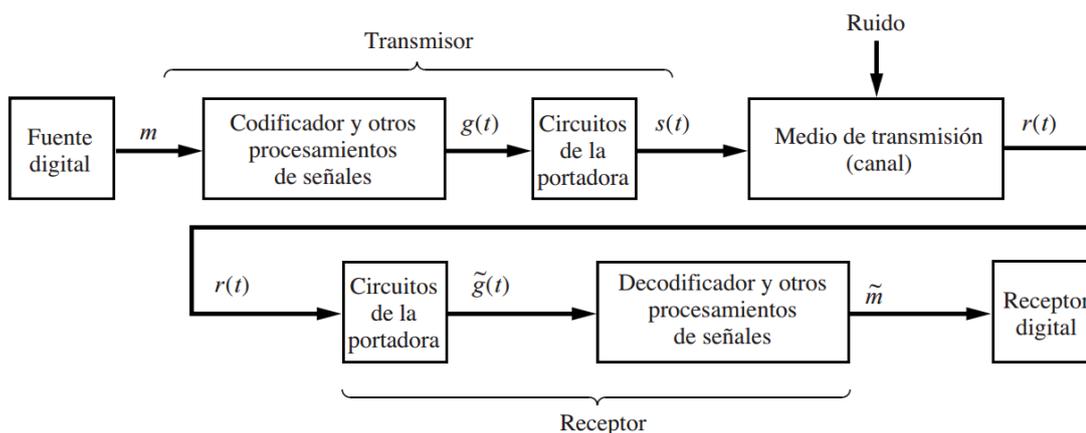
# 1. MARCO TEORICO

En este capítulo se hace una breve introducción de lo que es un sistema de comunicación inalámbrica, los elementos que componen el sistema como son los ecualizadores, secuencias de entrenamiento, métodos de modulación, técnicas de compresión y codificación utilizada para la transmisión de audio y el medio por donde se trasmite la información, es decir, los diferentes canales que se van a emular.

## 1.1. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS

Un sistema de comunicación inalámbrica es aquel sistema donde el transmisor y el receptor no se encuentra unido por un medio de propagación físico guiado (cables), si no que la comunicación en sus extremos se da por medio de ondas electromagnéticas moduladas a través del aire. [3]

Un sistema de comunicación digital transfiere información de una fuente digital al receptor adecuado [4]. Los diferentes tipos de fuentes pueden unirse y ser transmitidos sobre un sistema digital común de transmisión. La fuente de información puede ser tanto de tipo analógico como digital.

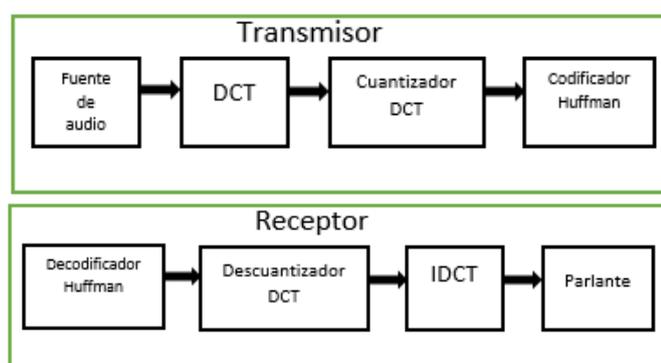


**Fig. 1.** Elementos de un sistema de comunicaciones digital. [4]

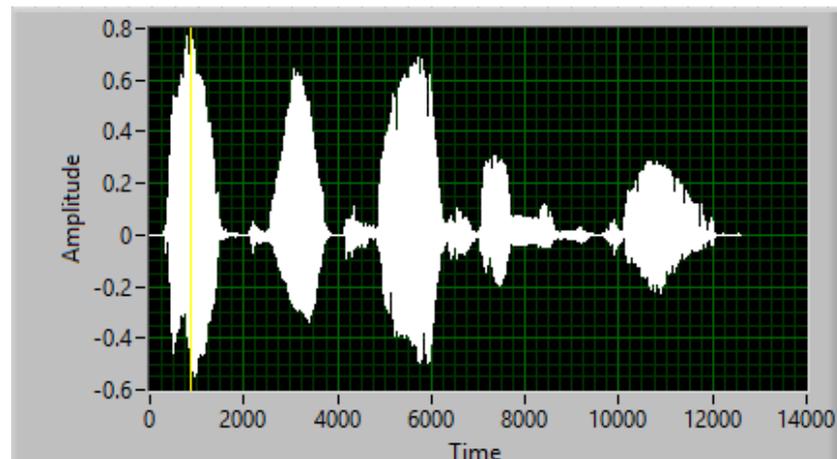
El primer bloque que se observa en la figura corresponde con los datos de una fuente digital de información, sea audio, texto, video, imagen, etc. En el transmisor se observa el bloque codificador y otros procesamientos de señales que posee, aquí podemos encontrar moduladores, codificadores de fuente, codificadores de canal, filtros. En el siguiente bloque de circuitos de portadora podemos encontrar amplificadores, osciloscopio entre otros elementos. Entre el transmisor y el receptor se encuentra el medio de transmisión, es decir, el canal de comunicación por donde se va a propagar la información en nuestro caso es el aire, siendo afectados por el ruido y otros factores característicos de ambientes interiores y exteriores. En el lado del receptor se encuentran bloques decodificadores que realizan los procesos inversos como demoduladores, decodificador de fuente, decodificadores de canal, ecualizadores con el objetivo de estimar y reconstruir la señal de la fuente original digital y reproducirla.

## 1.2. TRANSMISIÓN DE AUDIO

El primer bloque que se observa en la figura 2 en la parte del transmisor corresponde con los datos de una fuente de información. En nuestro caso la fuente es una señal de voz, la señal se debe muestrear para obtener su representación digital. La funcionalidad de los siguientes es representar la información de la fuente con la cantidad de bits más baja posible, lo cual requiere de algoritmos de compresión de datos como por ejemplo algoritmo de Huffman o la transformada coseno discreta (DCT), la cual, ignora los valores insignificantes para suministrar compresión de datos. En el lado del receptor se encuentran los bloques que realizan los procesos inversos como el decodificador del algoritmo Huffman y la transformada inversa de coseno discreto (IDCT), con el objetivo de reconstruir la señal original a partir de estimaciones de la señal muestreada. [2]

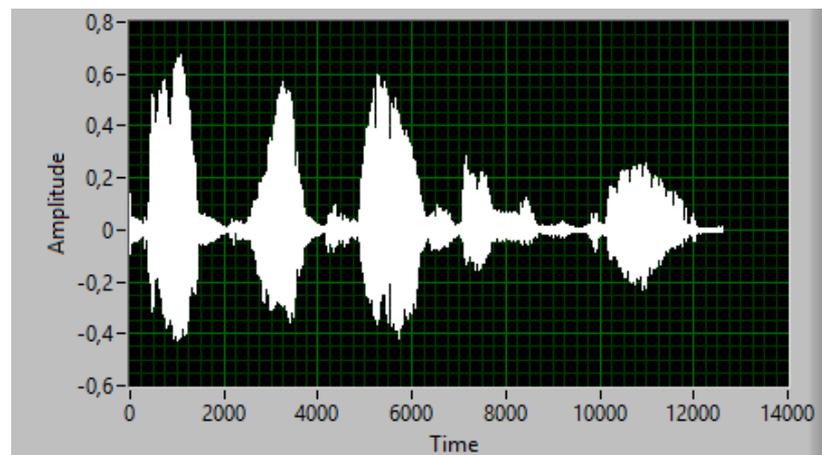


**Fig. 2.** Diagrama de bloque del procesamiento de la señal de audio. [2]



**Fig. 3.** Señal muestreada en el transmisor.

En la Fig. 3 se observa la señal de audio muestreada antes de ser transmitida y distorsionada por los efectos del canal.



**Fig. 4.** Señal muestreada en el receptor.

En la Fig. 4 se observa la señal de audio estimada y reconstruida después de ser decodificada en el receptor, lista para ser reproducida.

### 1.2.1. La transformada discreta del coseno (DCT)

Una técnica estándar para compresión es usar una representación en el dominio de la frecuencia de la señal. Normalmente, una señal de audio se encuentra principalmente en la parte inferior del rango de frecuencia, por lo tanto, con el fin de comprimir la señal, la práctica común es ignorar los componentes de alta frecuencia (redondear con 0). Aquí hacemos uso de la transformación discreta del Coseno (DCT) para obtener una representación en el dominio de la frecuencia de la señal de audio. [2]

Para nuestra transmisión de audio se ha utilizado las fórmulas estándar para calcular 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 transformada discreta del coseno inverso es el proceso que se encarga de reconstruir el conjunto de muestra a partir de un conjunto de estimaciones de los coeficientes DCT. No obstante, tenga en cuenta que algunos coeficientes DCT fueron desechados o ignorados. En esta etapa se debe sustituir todos los coeficientes DCT rechazados por 0 y luego realizar la DCT inversa sobre las estimaciones recibidas. [2]

### 1.2.2. Algoritmos de Huffman

La codificación Huffman es una codificación de longitud variable, utilizada para compresión de datos, donde la longitud de cada código depende de la frecuencia de aparición de cada símbolo, mientras mayor sea la frecuencia de aparición, su código asociado será más corto. Es una codificación sin prefijos, es decir, la primera parte de la codificación de un símbolo no es igual a otra codificación, evitando la ambigüedad del mensaje. [5]

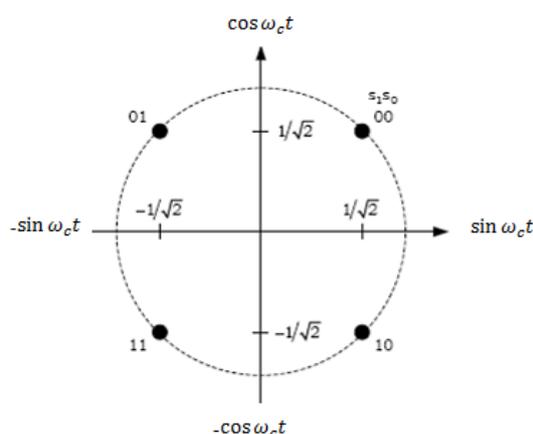
En la transmisión de audio, después del proceso DCT y la cuantización, obtenemos una matriz de muestras en el dominio de frecuencia donde cada muestra es un número binario de longitud "Resolución", nosotros usamos la codificación Huffman a fin de explotar la redundancia de las muestras que se repiten con más frecuencia que otras y poder comprimir los datos con más detalle. [2]

### 1.3. MODULACIÓN DIGITAL

Son un conjunto de técnicas que nos permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación al transportar la información sobre una onda portadora, es posible enviar más información de manera simultánea y protegiéndola de la presencia ruido e interferencias. [6]

#### 1.3.1. QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

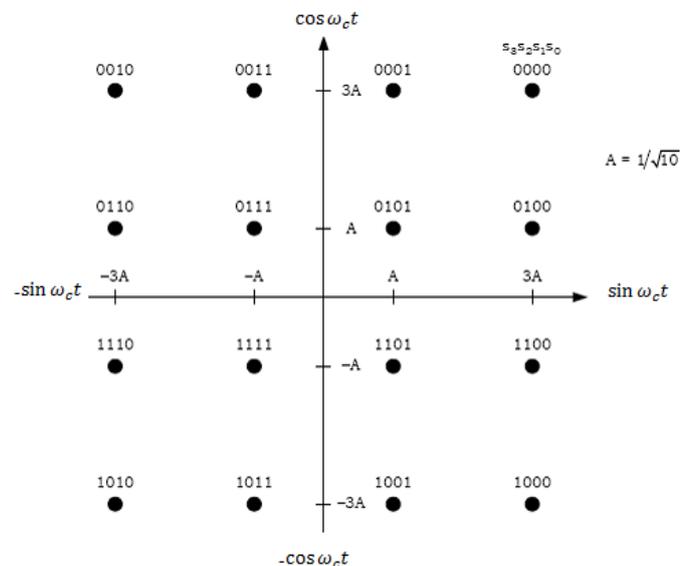
Es una modulación digital MPSK, donde  $M=4$ , la señal de portadora de frecuencia  $\omega_c$  tiene 4 posibles fases de salida diferentes y por consiguiente  $N_b = \log_2(M) = 2$ , donde  $N_b$  corresponde al número de bits por símbolo, es decir, los datos de entrada binarios están compuesto por un grupo de 2 bits, llamados dibits y que producen 4 combinaciones posibles. Además la amplitud de la señal de la portadora siempre es constante. [6]. En la Fig. 5, se puede observar una constelación QPSK con sus 4 posibles símbolos y sus correspondientes dibits.



**Fig. 5.** Constelación de la Modulación QPSK. [7]

### 1.3.2. 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Es una modulación digital M-QAM, siendo  $M=16$  y  $N_b = \log_2(M) = 4$ , donde  $N_b$  corresponde al número de bits por símbolo, de esta forma el modulador de 16 QAM trata los datos de entrada en grupos de 4 bits llamados quadbits. Esta técnica modula la señal de la portadora tanto en la amplitud como en su fase conjuntamente [6]. En la Fig. 6 se puede observar una constelación 16-QAM con sus 16 posibles símbolos y sus correspondientes quadbits.



**Fig. 6.** Constelación de la Modulación 16-QAM. [7]

## **1.4. CANALES INALÁMBRICOS**

Canal es el término usado para describir al medio de propagación de la señal entre el transmisor y el receptor y existen diversos factores que degradan la calidad de la señal cuando es transmitida por el aire y uno de los principales es el desvanecimiento rápido. De cierta forma para predecir el comportamiento de las señales en un medio impredecible se ha desarrollado diferentes modelos de canal inalámbrico. [8]

### **1.4.1. Canales multicaminos**

Es un canal donde la propagación de las señales es afectada por la difracción, reflexión y dispersión produciendo que la señal llegue al receptor por dos o más trayectorias en diferentes tiempos. [8]

### **1.4.2. Canales Inalámbricos que se van a estudiar**

En las siguientes tablas se muestra las características de los canales que se van emular para las diferentes pruebas del sistema de comunicación inalámbrica, detallando el tiempo del retardo y la potencia del pulso de los retardos.

En la tabla 1 se identifican dos canales multipasos cuyas características corresponde a canales exteriores (Outdoor) de áreas rurales, donde el Canal A denominado OA posee 4 retardos y el Canal B denominado OB posee 6 retardos, cada uno con diferentes tiempos y amplitudes.

**Tabla 1.** Canales Outdoor - Áreas Rurales.

Canales A		Canales B	
Delay (nsec)	Avg Power (dB)	Delay (nsec)	Avg Power (dB)
0	0	0	0
200	-2	100	-4
400	-10	200	-8
600	-20	300	-12
		500	-16
		700	-20

En la tabla 2 se identifican dos canales multipasos cuyas características corresponde a canales interiores (indoor) de áreas residenciales, donde el Canal A denominado IA posee 2 retardos y el Canal B denominado IB posee 4 retardos, cada uno con diferentes tiempos y amplitudes.

**Tabla 2.** Canales Indoor - Residenciales.

Canales A		Canales B	
Delay (nsec)	Avg Power (dB)	Delay (nsec)	Avg Power (dB)
0	0	0	0
100	-13,8	100	-6
		200	-11,9
		300	-17,9

## 1.5. SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO

Es un patrón de bits que poseen buenas propiedades de auto-correlación y correlación cruzada ya pre-establecidas tanto en el transmisor como en el receptor e insertadas al inicio de los datos modulados, con el objetivo de estimar los coeficientes del filtro y del canal, utilizadas para la sincronización

de tramas y pueden ser empleadas para otros propósitos en el receptor. Las secuencias de entrenamiento implementadas en el análisis del proyecto se detallan a continuación:

### 1.5.1. Código Barker

Códigos Barker o códigos de dispersión son un conjunto de secuencias con fuertes propiedades de autocorrelación aperiódicas. Es una secuencia rápida de valores,  $\pm 1$ . Esta secuencia es muy utilizada en la técnica de espectro ensanchado [1]. En la tabla 3 se puede apreciar las diferentes secuencias Barker con su respectivo tamaño.

**Tabla 3.** Secuencias Barker [1].

Code Length	Barker Sequence
2	[- +. - -]
3	[- - - +]
4	[- + - -, - + + +]
5	[- - - + -]
7	[- - - + + - +]
11	[- - - + + + - + + - +]
13	[- - - - - + + - - + + - -]

### 1.5.2. Códigos Gold

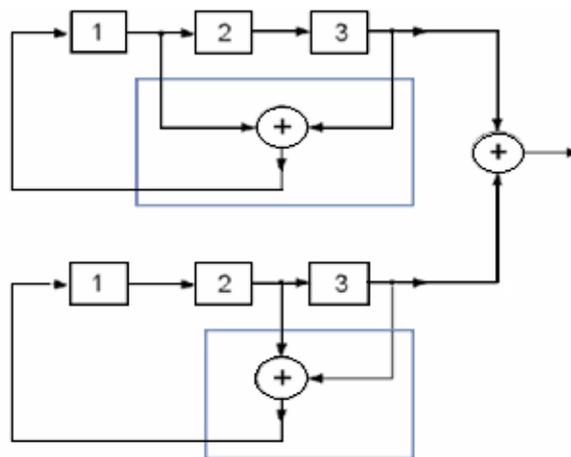
Un conjunto de secuencias de Gold son generadas mediante la suma módulo-2 de dos M-Secuencias (pareja preferente) de igual longitud y longitud máxima  $2^m - 1$  tal que el valor absoluto de la correlación cruzada sea menor o igual que R.

$$R = \begin{cases} 2^{(m+1)/2} + 1; & m \text{ impar} \\ 2^{(m+1)/2} + 1; & m \text{ par } \wedge m \neq \text{mod } 4 \end{cases} \quad (2)$$

Las dos M-Secuencias partiendo de distintos estados iniciales son capaces de generar un conjunto de  $2^{m+1}$  secuencias Gold distintas. [10]

Ejemplo de secuencias Gold:

Dado dos registros de  $m=3$ ,  $N=7$  y  $R=5$  y los polinomios que generan las secuencias:  $G_1(z) = 1 + x + x^3$  y  $G_2(z) = 1 + x^2 + x^3$  al pasar por el generador de secuencias que se observa en la Fig. 7, este generador es un sumador binario que se retroalimenta y va generando todas las posibles secuencias según los estados que se inicialicen. [10]



**Fig. 7.** Generador de secuencias Gold. [10]

En la tabla 4 se observa las diferentes secuencias Gold obtenidas a través del generador de secuencias, con los polinomios anteriormente mencionados.

**Tabla 4.** Secuencias Gold Obtenidas [10].

Estado Inicial reg. 1	Estado Inicial reg. 2	Secuencia Gold
111	111	0000110
111	110	1001101
111	101	0101000
111	010	1011010
111	100	1100011
111	001	0111111
111	011	0010001
111	000	1110100
000	111	1110010

### 1.6. SINCRONIZACIÓN DE TRAMA

La sincronización de trama tiene como propósito resolver los retrasos que son múltiplos del periodo de símbolo, para esto tenemos que determinar el inicio de la trama encontrando una referencia conocida en la señal transmitida. Antes de las operaciones subsecuentes en la recepción como la estimación de canal y ecualización. La sincronización de trama se enfoca mucho en las propiedades de correlación y periodicidad de la secuencia de entrenamiento. [1]

El algoritmo de Moose proporciona una excelente forma de realizar la sincronización de trama evaluando cuando ocurre el pico de correlación más alto en el momento que el par de secuencias de entrenamiento se encuentran, determinando el inicio de la trama en el receptor.[1]

## **1.7. ECUALIZACIÓN**

El efecto de un sistema de ecualización es compensar las deficiencias del canal de transmisión, tales como la distorsión de fase y amplitud dependiente de la frecuencia. Además de la corrección de anomalías de respuesta en frecuencia del canal, el ecualizador puede cancelar los efectos de los componentes de múltiples trayectorias de la señal, lo que puede manifestarse en forma de ecos de voz, fantasmas de vídeo o condiciones de desvanecimiento de Rayleigh en los canales de comunicaciones móviles. Ecualizadores diseñados específicamente para la corrección de múltiples trayectos a menudo se denominan de eco-canceladores. [1]

Para mitigar la interferencia intersimbólica (ISI) se utiliza técnicas de filtros adaptativos o también llamados técnicas de ecualización. Los cuales se clasifican en 2 grupos: ecualizadores lineales y ecualizadores no lineales [3]. Los ecualizadores lineales son altamente utilizados en canales con poca incidencia de ISI debido a que tienen un buen desempeño y son más simples de implementar a diferencia de los ecualizadores no lineales. Los ecualizadores lineales implementados en el análisis del proyecto son los siguientes:

### **1.7.1. Ecualizador Directo**

El diseño de un ecualizador directo que estime la secuencia recibida logra ser más eficiente que utilizar técnicas de estimación y ecualización de

canal, debido a que esta técnica solo necesita resolver un problema de estimación de mínimos cuadrados simple, es decir, el ecualizador es encontrado directamente de las secuencias de datos de entrenamiento observados, siendo más robusta al ruido. [1]

Se debe considerar que la señal recibida después de la ecualización lineal posee un retardo  $n_d$

$$\hat{s}[n - n_d] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n - l] \quad (3)$$

Supongamos que  $s[n] = t[n]$  para  $n = 0, 1, \dots, N_t$  es la secuencia de entrenamiento conocida. Entonces  $\hat{s}[n - n_d] = t[n - n_d]$  para  $n = n_d, n_d + 1, \dots, n_d + N_t$ . Reestructurando la ecuación con la secuencia de entrenamiento conocida. [8]

$$t[n] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n + n_d - l] \quad (4)$$

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

$$\underbrace{\begin{bmatrix} t[0] \\ t[1] \\ \vdots \\ t[N_t - 1] \end{bmatrix}}_t = \underbrace{\begin{bmatrix} Y[n_d] & \dots & Y[n_d - L_f] \\ Y[n_d + 1] & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y[n_d + N_t - 1] & \dots & Y[n_d + N_t - L_f] \end{bmatrix}}_{Y_{n_d}} \underbrace{\begin{bmatrix} f_n[0] \\ f_n[1] \\ \vdots \\ f_n[L_f] \end{bmatrix}}_{f_{n_d}} \quad (5)$$

Al resolver asumimos que  $Y$  es de rango completo en presencia del ruido.

La solución de los mínimos cuadrados es.

$$\hat{f}_{n_d} = (Y_{n_d} * Y_{n_d})^{-1} Y_{n_d} * t \quad (6)$$

El error cuadrático puede ser medido como:

$$J_f[n_d] = \|t - \hat{Y}_{n_d} \hat{f}_{n_d}\|^2 \quad (7)$$

Para que el error cuadrático se minimice  $J_f[n_d]$  la secuencia de entrenamiento  $n_d$  debe ser mayor, en otras palabras la longitud de la secuencia de entrenamiento determina la longitud del ecualizador  $L_f$ . Al observar la matriz  $Y_{n_d}$  esta puede ser cuadrada o rectangular siempre y cuando se cumpla que  $L_f \leq N_t - 1$ . [1].

### 1.7.2. Ecualizador Wiener

Es un ecualizador lineal preestablecido. El ecualizador o filtro Wiener soluciona el problema de estimación de señal a través de un proceso aleatorio de filtrado de una señal observada para señales estacionarias. Para la estimación de la señal se basa de un modelo estadístico llamado inferencia bayesiana. El filtro Wiener es óptimo para el Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE) ya que ajusta la señal estimada a la señal desea. [11]

Al analizar el filtro Wiener en un tiempo discreto consideramos las dos señales estacionaras en sentido amplio,  $S_k$  la señal que se desea estimar y  $Y_k$  la señal observada, con sus funciones de covarianzas conocidas  $R_s(k)$ ,  $R_y(k)$  y  $R_{sy}(k)$ . Para estimar  $S_k$  en función de  $Y_k$  debemos encontrar el MMSE lineal. [10]

Considerando un filtro Wiener de longitud  $N+1$ :

$$\hat{S}_k = \sum_{m=k-N}^k h_m Y_m = \sum_{i=0}^N h_i Y_{k-i} \quad (8)$$

Nosotros necesitamos encontrar los coeficientes  $h_i$  que minimicen el error cuadrático (MSE), para hacer esto se debe aplicar el principio de ortogonalidad. [3] [10]

$$E[(S_k - \hat{S}_k)Y_{k-j}] = 0 ; j = 0,1 \dots, N \quad (9)$$

Dando como resultado:

$$\sum_{i=0}^N h_i E[Y_{k-i}Y_{k-j}] = E(S_k Y_{k-j}) \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^N h_i R_y(i-j) = R_{sy}(j) \quad (11)$$

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

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_y(0) & R_y(1) & \dots & R_y(N) \\ R_y(1) & \ddots & \ddots & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & R_y(1) \\ R_y(N) & \ddots & R_y(1) & R_y(0) \end{bmatrix}}_{R_y} \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix}}_h = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{sy}(0) \\ \vdots \\ R_{sy}(N) \end{bmatrix}}_{r_{sy}} \quad (12)$$

$$R_y h = r_{sy} \rightarrow h = R_y^{-1} R_{sy} \quad (13)$$

El sistema de ecuaciones son tipo Yule-Walker, donde  $R_y \geq 0$ . Ahora el MMSE puede ser más fácil calcular. [3] [10]

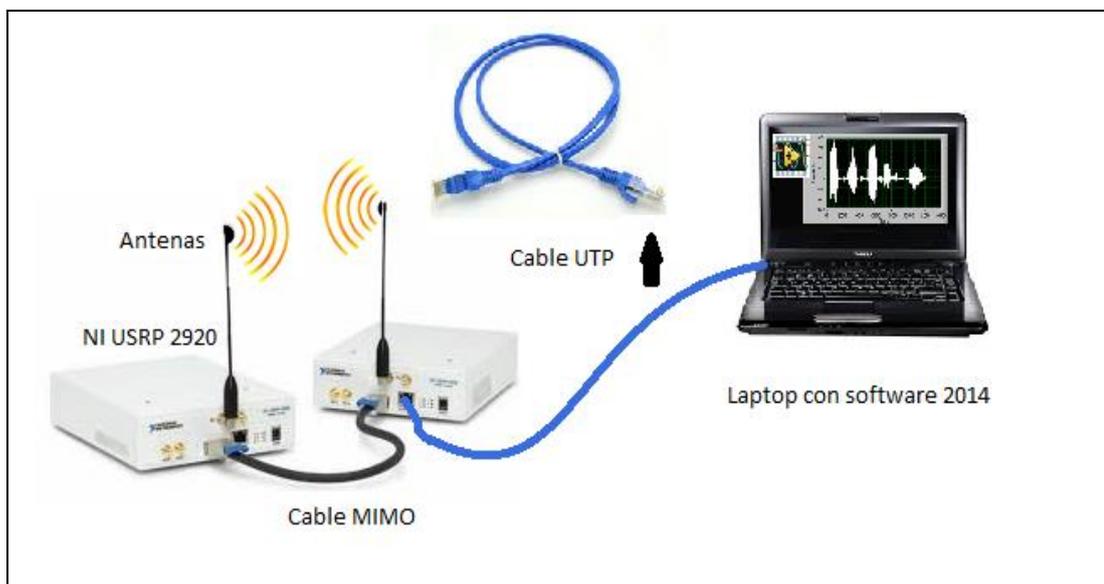
$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = E[(S_k - \hat{S}_k)(-S_k)] \quad (14)$$

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = R_y(0) - E[(S_k \hat{S}_k)] \quad (15)$$

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = R_y(0) - h^T R_{sy} \quad (16)$$

## 2. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Una vez implementado nuestro sistema de comunicación inalámbrico con los USRP 2920 y la programación de los VI's con el software Labview 2014, como se observa en la Fig. 8 se procedió a realizar las distintas pruebas transmitiendo un audio pregrabado y tomando muestras de los diferentes escenarios como los diferentes canales, modulaciones, ecualizadores y secuencias de entrenamiento que han sido objeto de estudio en este proyecto.

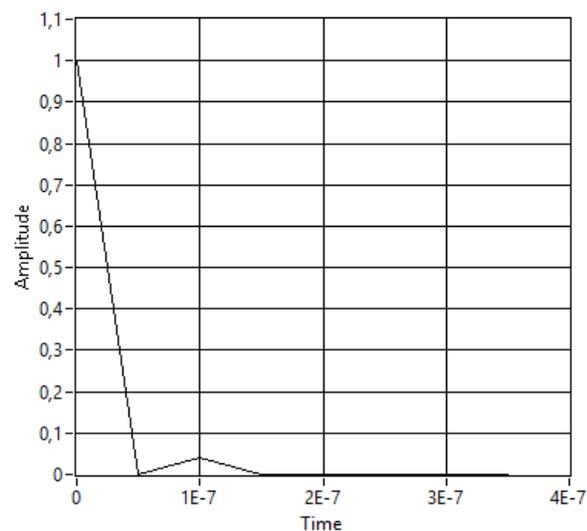


**Fig. 8.** Equipos del sistema de comunicación implementado para el ambiente de pruebas.

## 2.1. Respuestas Impulso de los diferentes tipos de canales

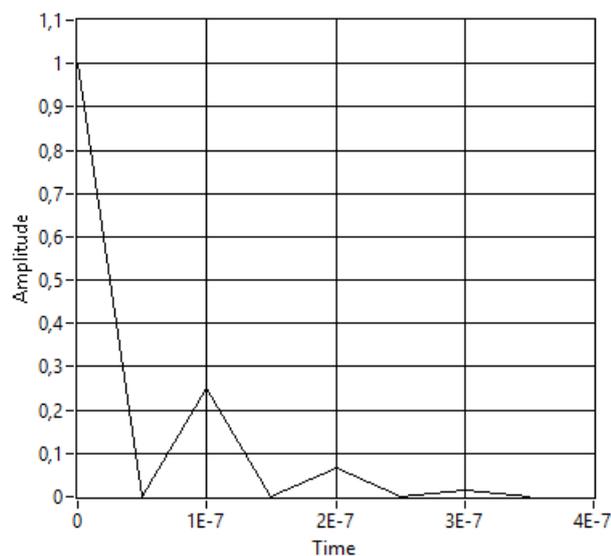
Conocer la respuesta impulso de un canal es muy importante porque nos da información de las propiedades de dispersión de las señales en un canal para predecir el comportamiento de los sistemas de comunicaciones, a continuación se muestra el perfil de potencias de retardos de los canales anteriormente mencionados. [9]

En la Fig. 9 se observa el perfil de potencia correspondiente al canal Indoor A, denominado IA. Donde se aprecia los 2 pasos o retardos de la señal que fueron descritos en la Tabla 2 en un ambiente interior residencial.



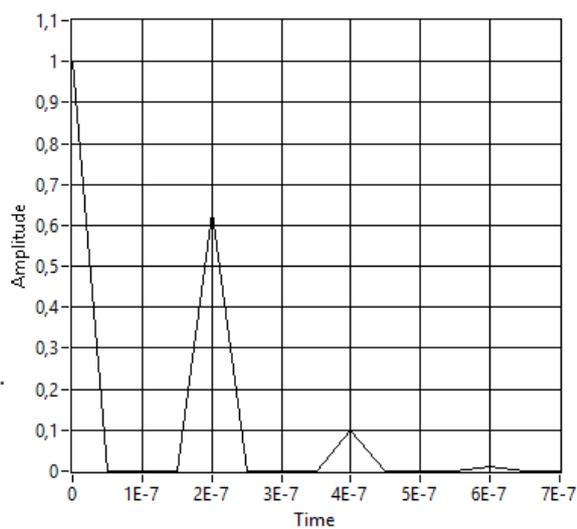
**Fig. 9.** Perfil de potencia de retardos del canal Indoor A.

En la Fig. 10 se observa el perfil de potencia correspondiente al canal Indoor B, denominado IB. Donde se aprecia los 4 pasos o retardos que fueron descritos en la Tabla 2 en un ambiente interior de área residencial.



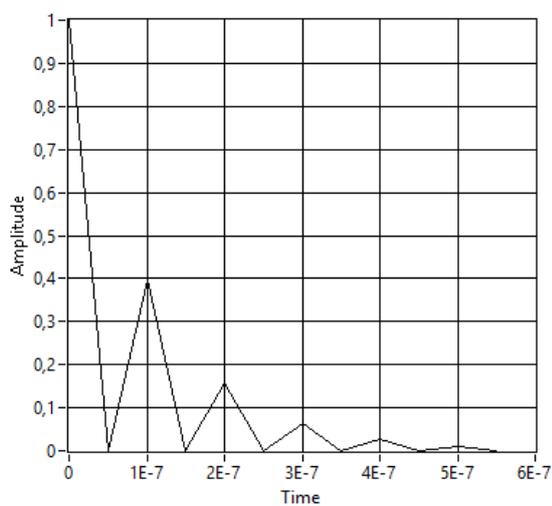
**Fig. 10.** Perfil de potencia de retardos del canal Indoor B.

En la Fig. 11 se observa el perfil de potencia correspondiente al canal outdoor A, denominado OA. Donde se aprecia los 4 pasos o retardos que fueron descritos en la Tabla 1 en un ambiente exterior de área rural.



**Fig. 11.** Perfil de potencia de retardos del canal Outdoor A.

En la Fig. 12 se observa el perfil de potencia correspondiente al canal outdoor B, denominado OB. Donde se aprecia los 6 pasos o retardos que fueron descritos en la Tabla 1 en una ambiente exterior de área rural.



**Fig. 12.** Perfil de potencia de retardos del canal Outdoor A.

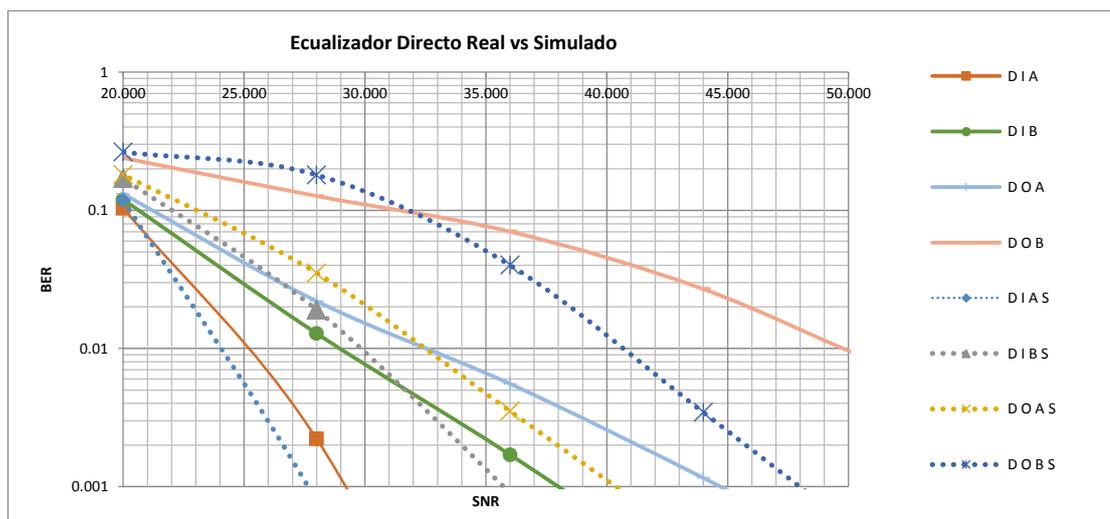
## **2.2. Respuestas de los ecualizadores a diferentes tipos de canales**

Para la simulación de los diferentes canales multipasos indoor y outdoor los cuales se encuentran detallados en la tabla 1 y tabla 2, se utilizó un modelamiento de canal ISI.

Primero nos enfocaremos como cada ecualizador responde a cada canal, con modulación QPSK, teniendo en consideración que los dos ecualizadores presentan el mismo escenario, es decir, secuencia de entrenamiento Gold, la misma tasa de transmisión y recepción, resolución de audio, etc.

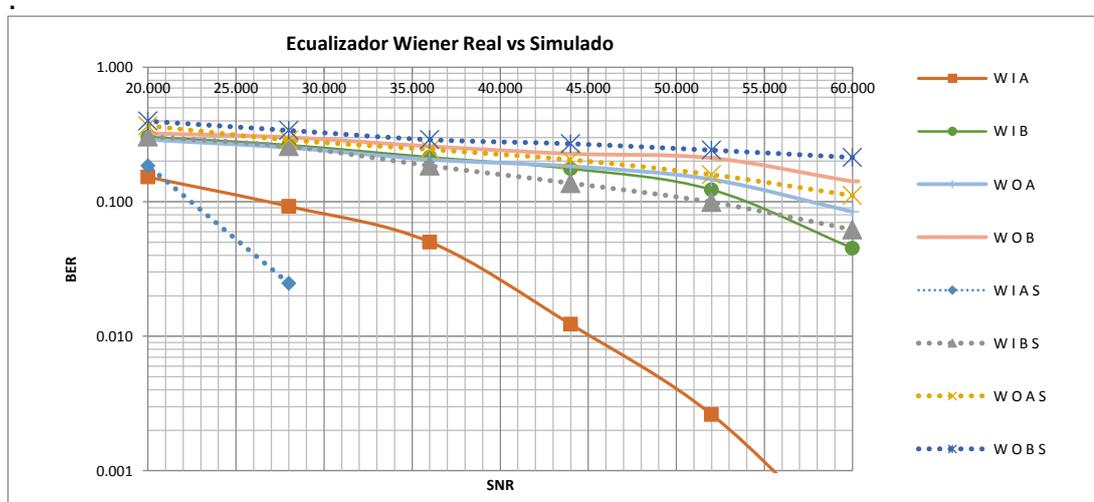
A continuación las gráficas BER vs SNR, la cuales son una de las mejores formas de medir el desempeño de los ecualizadores.

Nota: por motivos de visualización de las gráficas, los nombres de los diferentes escenarios como ecualizadores canales y secuencias de entrenamiento se han resumido con su primera letra como por ejemplo: ecualizador Directo: D, ecualizador Wiener: W o canal Indoor A: I A, canal Outdoor B: O B, Simulados: S etc.



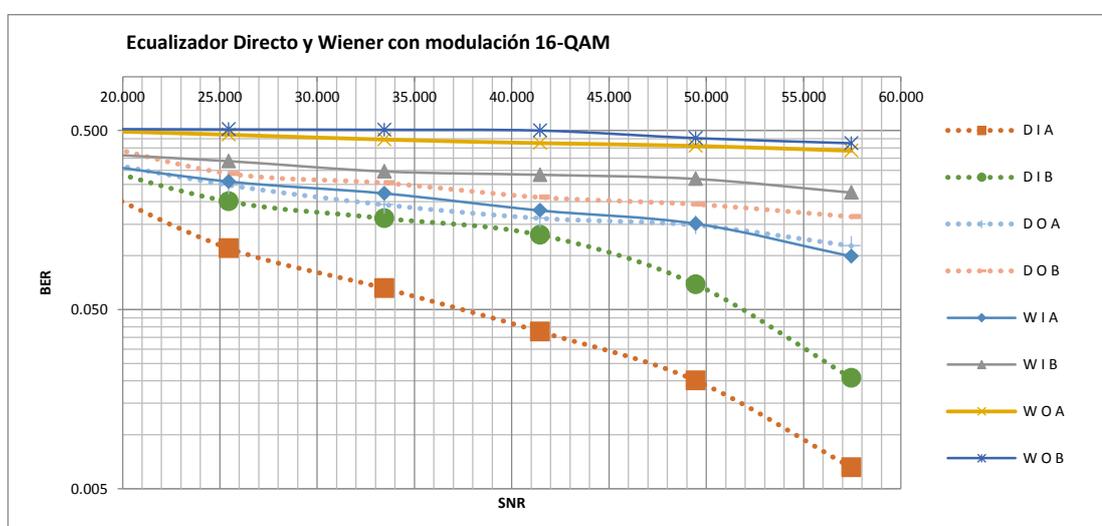
**Fig. 13.** BER vs SNR del ecualizador Directo en canales indoor y outdoor, modulación QPSK.

En la Fig. 13. Se observa como el ecualizador directo en un ambiente indoor A tiene un mejor respuesta al decaer 28 dB. y en la simulación del mismo canal la curva decae a los 29 dB.



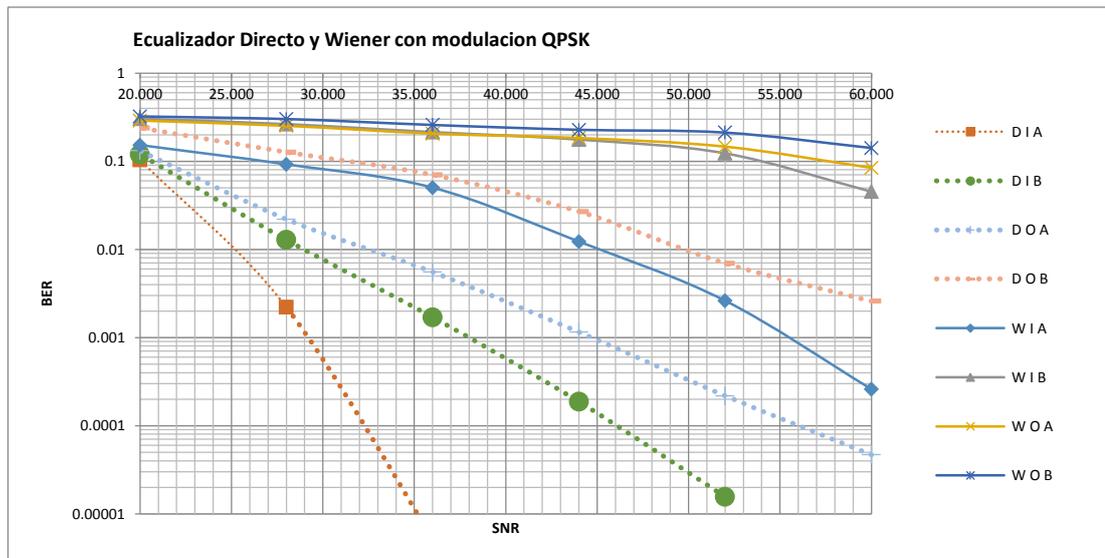
**Fig. 14.** BER vs SNR del ecualizador Wiener en canales indoor y outdoor, modulación QPSK.

Como se puede apreciar en la Fig. 13 y 14 ambos ecualizadores tienen un mejor rendimiento ante el BER en los canales indoor que en los canales outdoor, debido como se muestran en las Tablas 1 y 2, los canales outdoor poseen mayor número y tiempos de retardo de propagación y una potencia del pulso del retardo más elevada haciendo que la señal se disperse y se corrompa con como mayor facilidad en presencia del ruido y la interferencia intersimbólica (ISI) y dificultando la tarea de estimación de los ecualizadores lineales.



**Fig. 15.** BER vs SNR de los ecualizadores Directo y Wiener en diferentes canales indoor y outdoor, modulación 16-QAM.

En la Fig. 15. Se observa como el ecualizador directo posee una mejor respuesta en comparación que el ecualizador Wiener, por ejemplo en canal indoor A, la curva para Directo desciende en 57 dB, mientras en Wiener tarda más en descender.



**Fig. 16.** BER vs SNR de los ecualizadores Directo y Wiener simulados en canales indoor y outdoor, modulación QPSK.

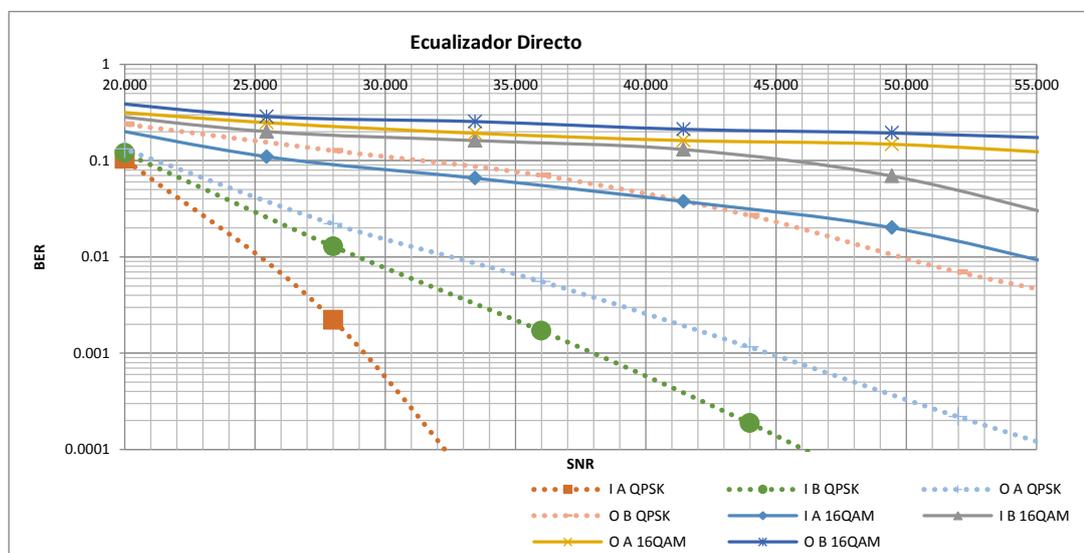
Al observar cuidadosamente las primeras curvas en decrecer se puede apreciar en la Fig. 15 y 16, el ecualizador Directo (D) presenta un mejor rendimiento en todos los canales Indoor (I) y Outdoor (O), para ambas modulaciones.

### 2.3. Respuestas de los ecualizadores a diferentes tipos de modulaciones

Para la elaboración de las pruebas de modulación los ecualizadores fueron sometidos a los diferentes canales indoor y outdoor, con una secuencia de

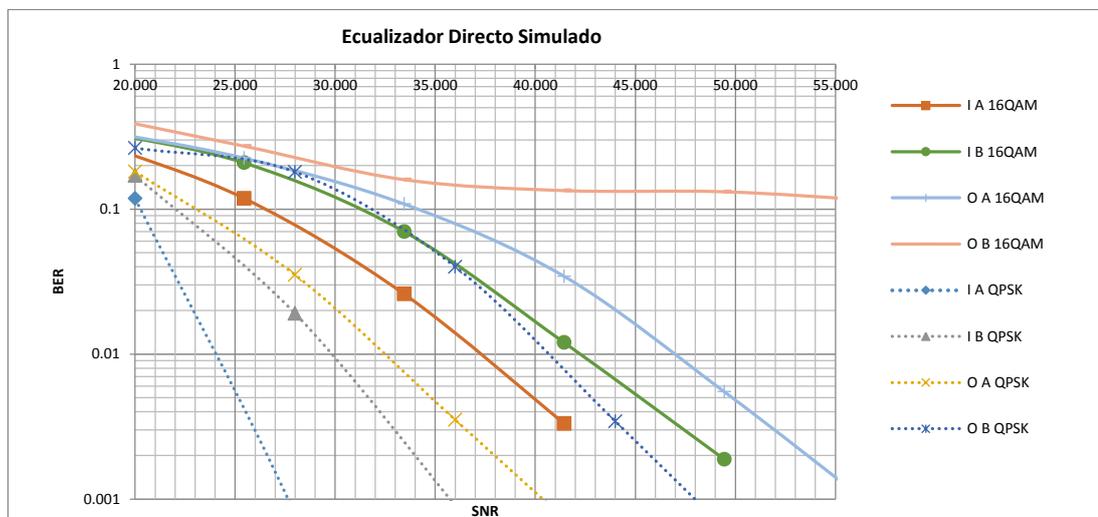
entrenamiento Gold de tamaño 15 y algoritmo de Moose de sincronización de trama y las modulaciones QPSK y 16-QAM.

Teóricamente sabemos que una modulación de 16-QAM posee mayor probabilidad de bit error que una modulación QPSK, debido al número y separación de sus símbolos, siendo más susceptible a ISI la modulación 16-QAM. Esto podemos apreciar en la Fig. 17 y 18 donde las primeras curvas en descender son las que corresponde a QPSK.



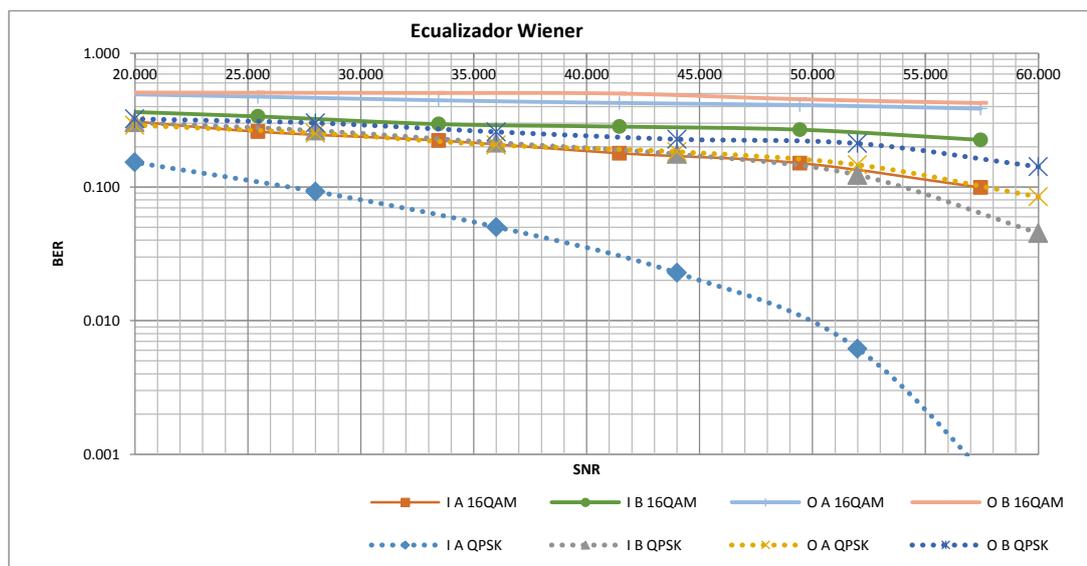
**Fig. 17.** BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM.

En la Fig. 17. Se observa como el ecualizador directo posee una mejor respuesta con una modulación QPSK, en todos los canales analizados.



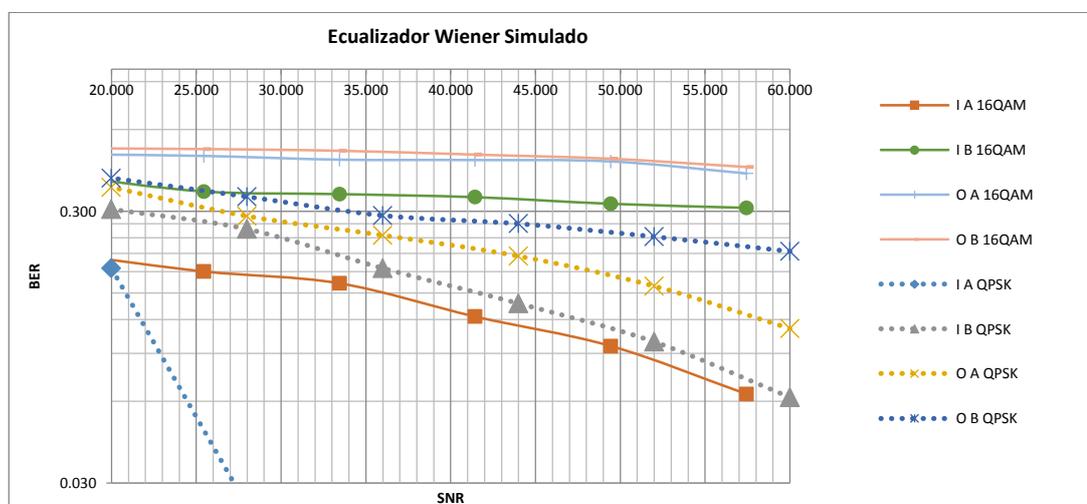
**Fig. 18.** BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM Simulados.

Se aprecia en las Fig. 17 y 18 como el ecualizador Directo tiene un mejor desempeño en QPSK y especialmente para los canales indoor, tanto en los datos simulados como en los reales, pero los canales outdoor donde existe un ISI más severo, con una modulación de 16-QAM, el ecualizador no posee un buen desempeño.



**Fig. 19.** BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM.

En las Fig. 19 se aprecia que la mejor respuesta del ecualizador Wiener es en una modulación QPSK en el canal Indoor A, teniendo un peor desempeño que el ecualizador Directo en canales con ISI muy severo.



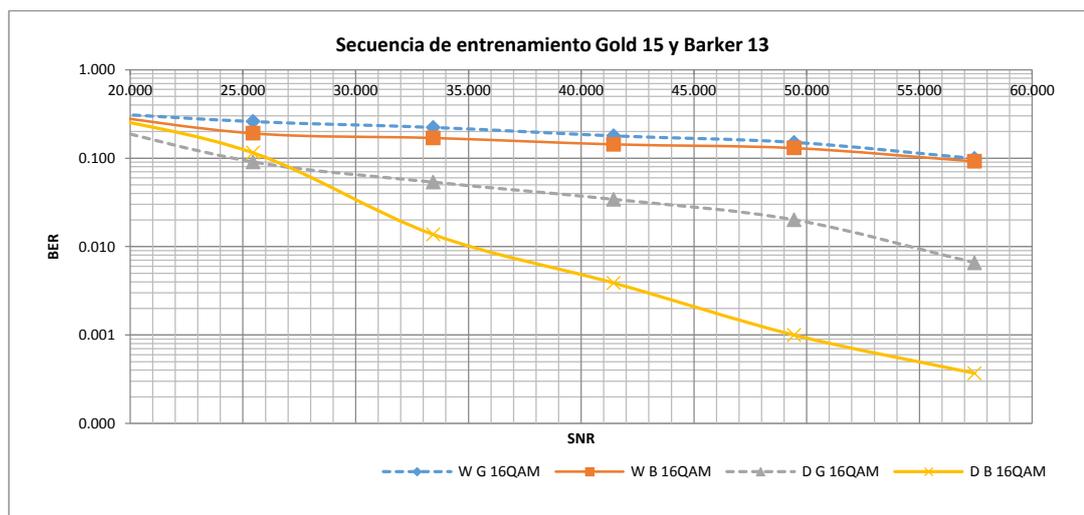
**Fig. 20.** BER vs SNR de ecualizador directo y modulación QPSK y 16 QAM.

En las Fig. 20 se aprecia que la mejor respuesta del ecualizador Wiener en el simulador es en una modulación QPSK en el canal Indoor A, teniendo un peor desempeño que el ecualizador Directo en canales con ISI muy severo.

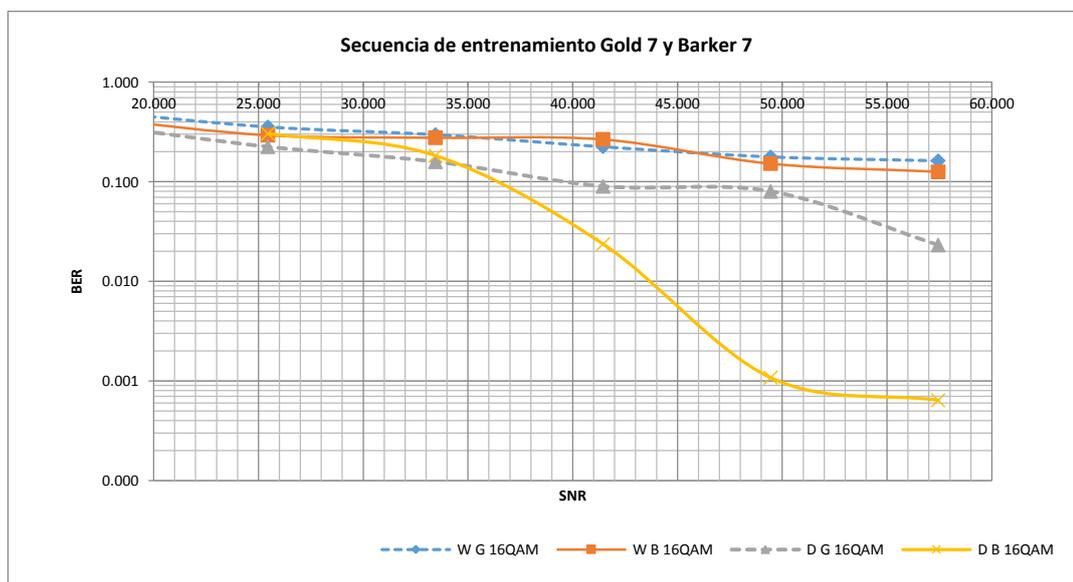
En las gráficas de las Fig. 15 y 16 podemos comprobar que el ecualizador directo (D) posee una mejor respuesta que el ecualizador Wiener (W) en las dos modulaciones QPSK y 16-QAM.

#### **2.4. Respuestas de los ecualizadores a diferentes secuencias de entrenamiento.**

Un factor muy importante que ayuda en la sincronización de trama y en la estimación del ecualizador es la secuencia de entrenamiento. Para la elaboración de las pruebas primero vamos a observar el comportamiento de los ecualizadores con diferentes secuencias de entrenamiento y por último como afecta al ecualizador los diferentes tamaños de una misma secuencia de entrenamiento en un mismo escenario.



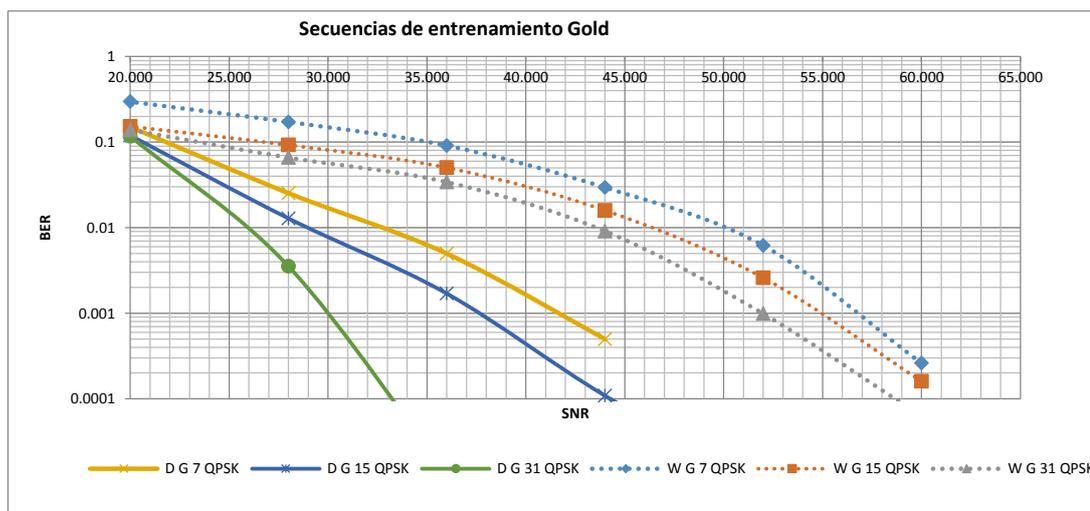
**Fig. 21.** BER vs SNR de los ecualizadores lineales con secuencia de entrenamiento Gold 15 y Barker 13.



**Fig. 22.** BER vs SNR de los ecualizadores lineales con secuencia de entrenamiento Gold 7 y Barker 7.

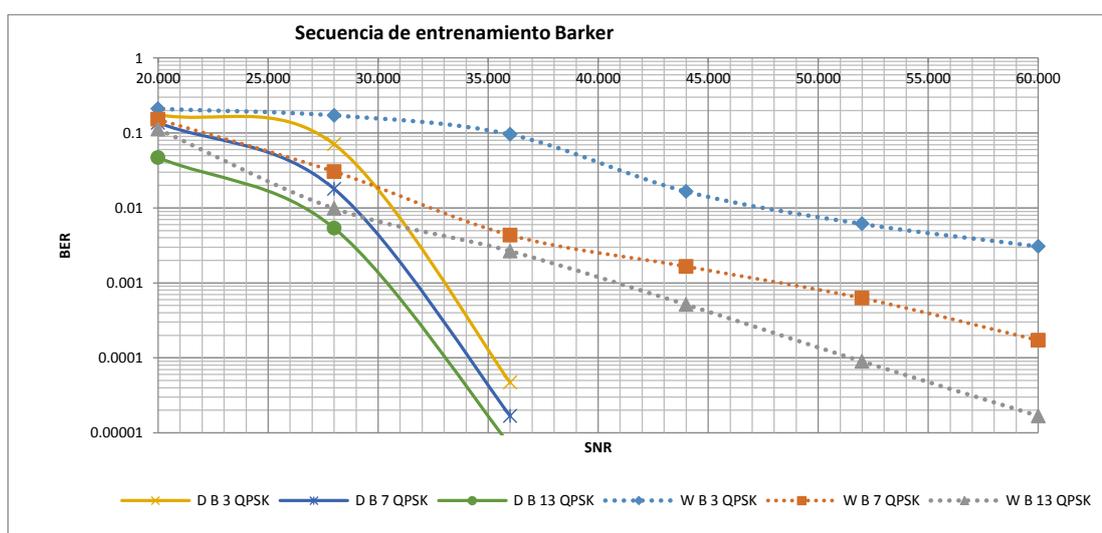
Dos factores importantes podemos apreciar al observar las curvas en la Fig. 21 y 22, el primero es que ambas secuencias de entrenamiento Barker (B) permiten una mejor estimación en ambos ecualizadores aunque, la secuencia de tamaño 7 es ligeramente superior a la secuencia Gold (B) y el segundo factor que nuevamente el ecualizador Directo presenta un mejor desempeño que el ecualizador Wiener con ambas secuencias de entrenamiento.

A continuación observaremos como los ecualizadores responden con diferentes tamaños de secuencia de entrenamiento para la realización de este análisis utilizamos una secuencia Gold de tamaño 7, 15 y 31 bits y para la secuencia de entrenamiento Barker los tamaños 3, 7, 13 bits.



**Fig. 23.** BER vs SNR del ecualizador Directo y Wiener con diferentes tamaños de la secuencia de entrenamiento Gold.

Se aprecia en la Fig. 23 como un mayor tamaño de la secuencia de entrenamiento mejora la respuesta del ecualizador. Donde en los dos ecualizadores la secuencia Gold de tamaño 31 es más robusta al ruido. Debido a que el tamaño de la secuencia de entrenamiento determina la longitud del filtro del ecualizador.



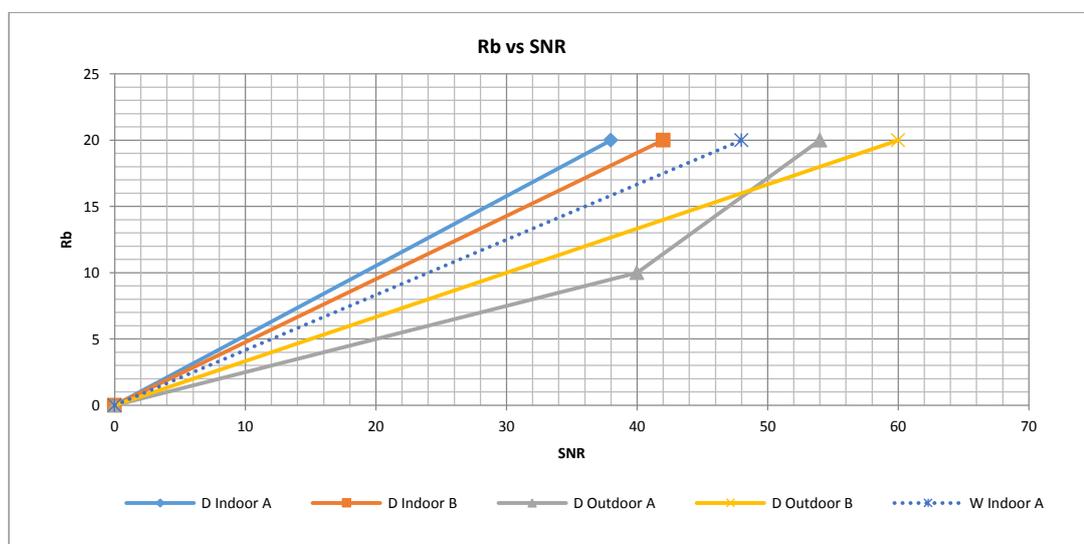
**Fig. 24.** BER vs SNR del ecualizador Directo y Wiener con diferentes tamaños de la secuencia de entrenamiento Barker.

Se aprecia en la Fig. 24 como un mayor tamaño de la secuencia de entrenamiento mejora la respuesta del ecualizador. Donde en los dos ecualizadores la secuencia Barker de tamaño 13 son más robusta al ruido.

En la gráfica de la Fig. 23 y 24 se puede observar que el mejor desempeño es la del ecualizador directo con una secuencia Gold de tamaño 31 (D G 31) y con una secuencia Barker de tamaño 13 (D B 13).

## 2.5. Tolerancia al ruido del sistema.

La siguiente prueba es muy importante debido a que buscamos un punto de frontera donde nuestro sistema es tolerable al ruido, tomando en cuenta que la tasa de muestreo depende mucho del canal y que el inverso de la tasa de símbolo corresponde al tiempo de símbolo, nosotros mantenemos un tiempo de símbolo igual a la separación de cada retraso y le suministramos un nivel de ruido al transmisor hasta encontrar el umbral donde el audio transmitido empieza a ser distorsionado o incomprensible.



**Fig. 25.** Rb vs SNR del ecualizador Directo y Wiener.

En la gráfica se puede apreciar que a medida aumenta la tasa de bit ( $R_b$ ), también aumenta la relación señal ruido (SNR), dicho esto podemos decir que el mejor sistema es aquel que tiene menos presencia de ruido en la señal a mayores tasas de transmisión de bits, es decir el ecualizador Directo en un canal Indoor A, es más tolerable al ruido a una tasa de 20 bits/s.

## CONCLUSIONES

Con los resultados expuestos en este trabajo podemos concluir lo siguiente:

- En los canales multipasos a medida que hay más retrasos se incrementa la interferencia intersimbólica ISI y los ecualizadores lineales no son óptimos en canales con ISI muy severo, esto se observó a través del comportamiento de los ecualizadores en las gráficas BER vs SNR en especialmente en los canales Outdoor donde el sistema se hace más sensible al ruido.
- El ecualizador Directo presenta un mejor método de estimación, esto se evidencio en todas las pruebas realizadas, debido que el ecualizador Wiener realiza un enfoque estadístico donde necesita de una señal deseada y de una señal observada para realizar la estimación, a esta dos señales le aplica el método de autocorrelación y correlación cruzada para aplicar el método estadístico de error cuadrático medio, dependiendo mucho de la propiedades de correlación de la secuencia de entrenamiento que corresponde a la señal observada para promediar el error, mientras q los ecualizadores directo realizan la estimación del error directamente de la secuencia de entrenamiento, lo que lo hace más robusto al ruido.

- Antes de elegir una modulación es importante tener en cuenta lo siguiente: las modulaciones QPSK son más robustas a ISI, mientras que la modulación 16-QAM transmite mayor número de bits por símbolo en un menor tiempo. Al utilizar un ecualizador Directo con una modulación 16-QAM podemos transmitir más rápido, lo cual es importante en una comunicación de audio, pero si lo hacemos en un canal con muchos retrasos la señal de audio llegará distorsionada por el ruido y el ISI, en este caso lo más adecuado sería preferir una comunicación comprensible con QPSK antes de una comunicación rápida sin sentido.
- La secuencia de entrenamiento Barker produjo un mejor desempeño en los ecualizadores que la secuencia Gold, debido a que las secuencias Barker presentan mejores propiedades de autocorrelación que las secuencias Gold y teniendo en cuenta que nosotros utilizamos cada secuencia de entrenamiento concatenada 4 veces sobresaliendo las propiedades de autocorrelación. Al aumentar el tamaño de la secuencias de entrenamiento mejoró la estimación de los ecualizadores minimizando el error cuadrático. Sin embargo no podemos afirmar que entre más grande sea la secuencia de entrenamiento en un sistema siempre obtendremos mejores resultados, debido a que cuando se presenta grandes desplazamiento

de frecuencias las propiedades de autocorrelación de las secuencias de entrenamiento de gran tamaño pueden fallar, acotando el rango de frecuencias que se pueden corregir. [1]

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robert w. Heat Jr. Ph.D., PE. "Digital Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP Platform", National Technology and Science Press.
- [2] Erik L, "EE49 Lab 1: Source Coding Lab: Cosine Transform (DCT), sample quantization, and Huffman coding", Version 9, National Instruments (2016).
- [3] Carlos Vélez, Mathew Kortum, "Diseño, simulación de esquemas de estimación del canal y ecualización de un sistema de comunicación de una sola portadora" Tesina de seminario previa para la obtención de título de ingeniero en Electrónica y telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del litoral. (2013).
- [4] León W. Couch, "Sistemas de comunicación digital y analógico" 7ma Ed. Pearson Educación, México, 2008, pp. 5, 18, 19.
- [5] Leandro Alegsa. (05/12/2010). Codificación Huffman [Online]. Disponible: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/codificacion%20huffman.php>
- [6] Santiago G. (21/12/2009). Sistemas de Modulación [Online]. Disponible: <http://www.analfatecnicos.net/archivos/15.SistemasModulacion.pdf>.
- [7] Electrical, Computer & Energy Engineering, UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER. Modulation Techniques [Online]. Disponible: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/UMB/modulate.htm>.
- [8] Ronald García, Julio Mejía, "Diseño, simulación de esquemas de modulación de un sistema de OFDM y de ecualización en el dominio de

la frecuencia” Tesina de seminario previa para la obtención de título de ingeniero en Electrónica y telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del litoral. (2013).

[9] Freddy Orozco, Claudia Pintos, "Diseño, simulación de códigos de canal en sistemas OFDM” Tesina de seminario previa para la obtención de título de ingeniero en Electrónica y telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del litoral. (2013).

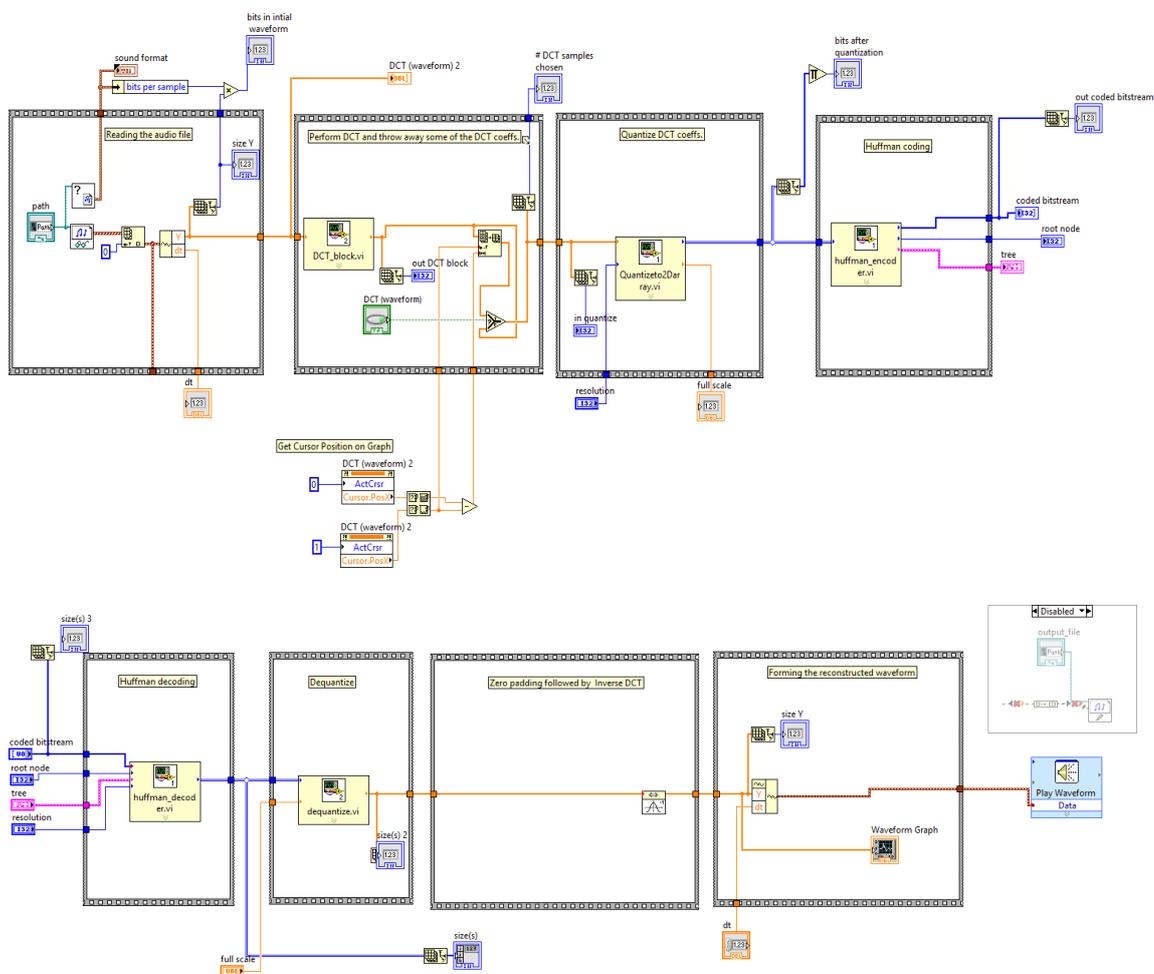
[10] Code Gold NEW BINARY USER CODES FOR DS CDMA COMMUNICATION Journal of Engineering Science and Technology December 2011, Vol. 6(6) S. Garg and N. Srivastava SMRITI GARG1,\* , NEELAM SRIVASTAVA2 pp 662.

[11] Prof. N. Shimkin The Wiener Filter, Technion – Israel Institute of Technology, Department of Electrical Engineering Estimation and Identification in Dynamical Systems (048825) Lecture Notes, Fall 2009.

# ANEXOS

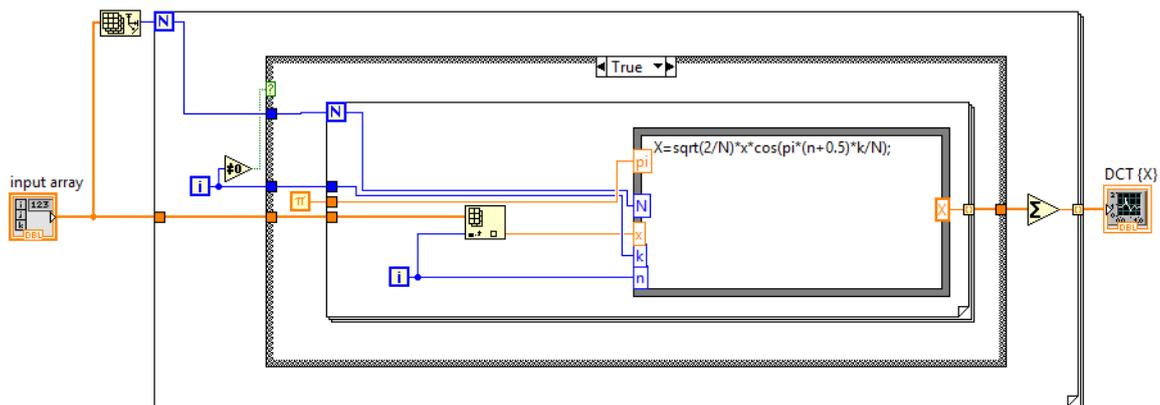
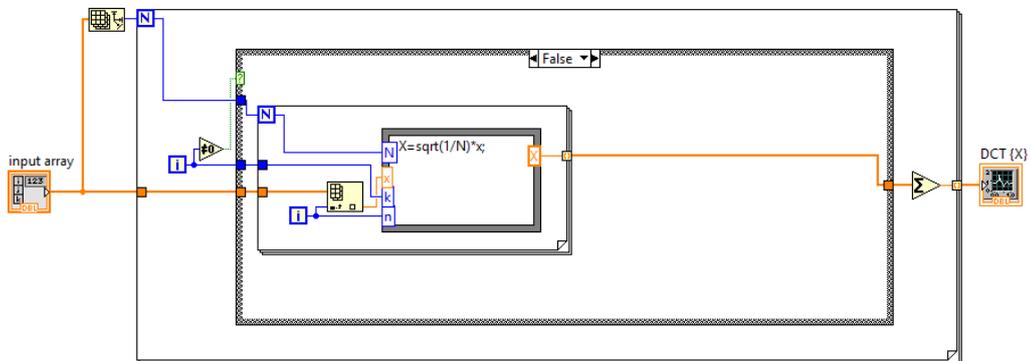
## ANEXO 1

### DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DE FUENTE DE AUDIO



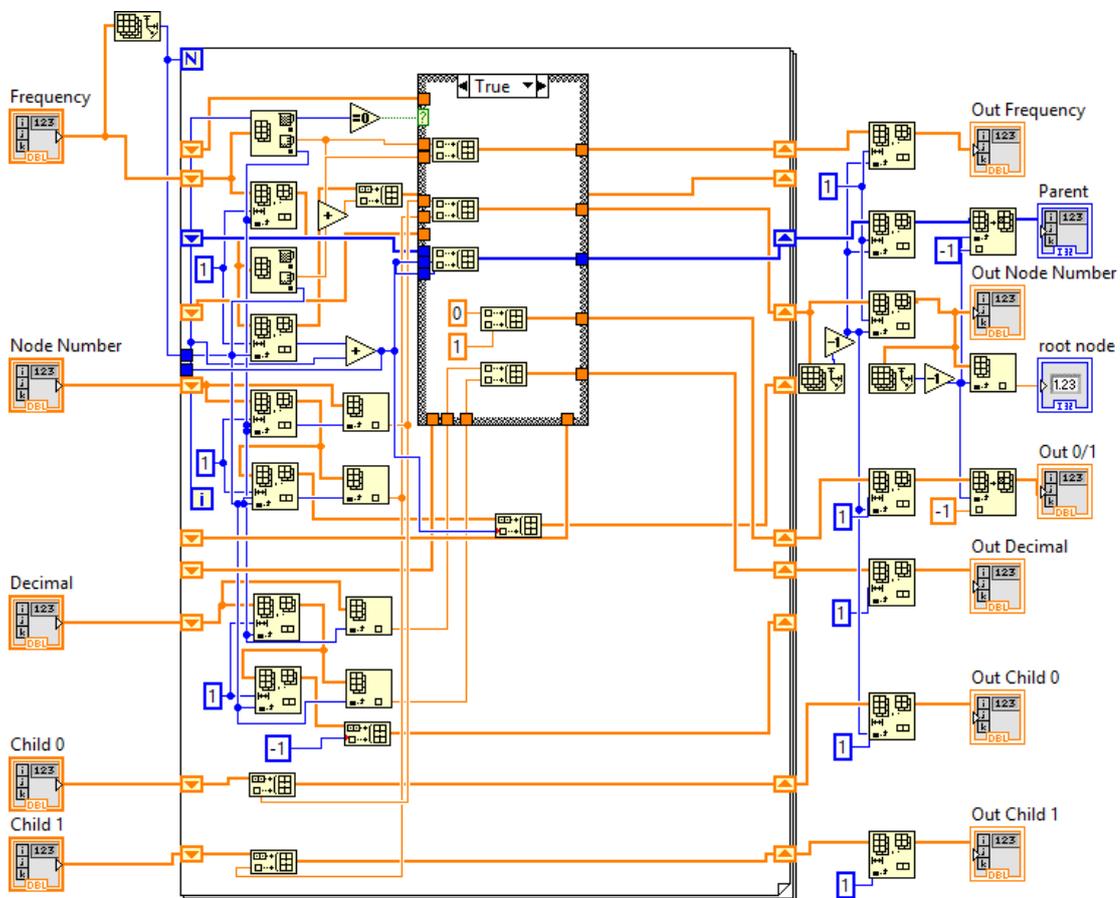
## ANEXO 2

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DE DCT



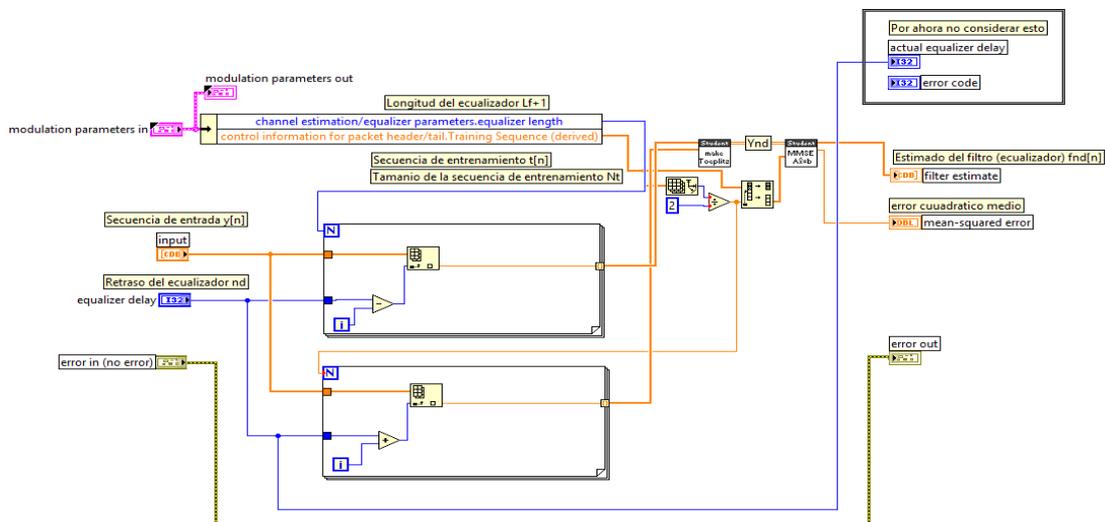
## ANEXO 3

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL ALGORITMO HUFFMAN

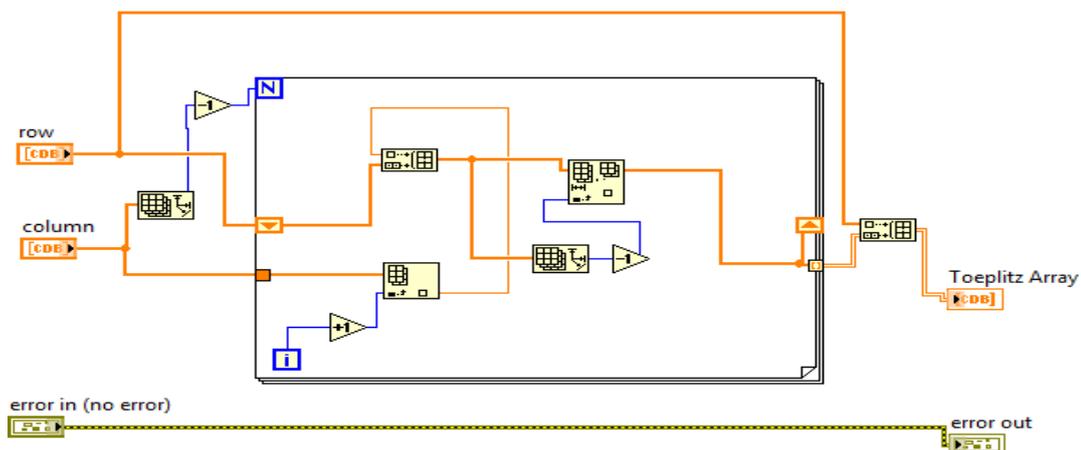


## ANEXO 4

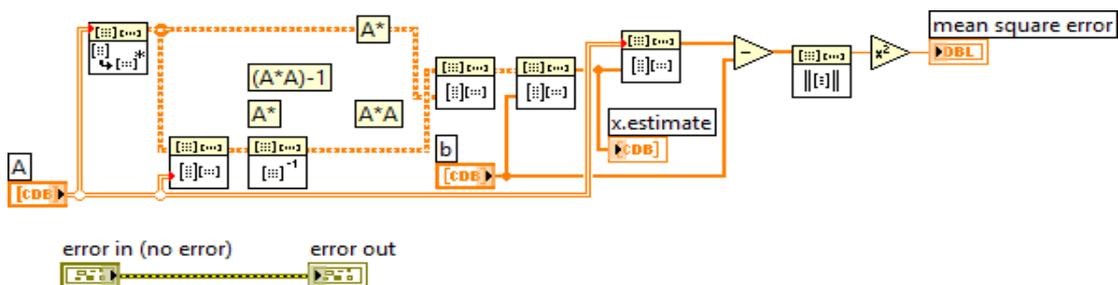
## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL ECUALIZADOR DIRECTO



## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DE LA MATRIX TOEPLITZ

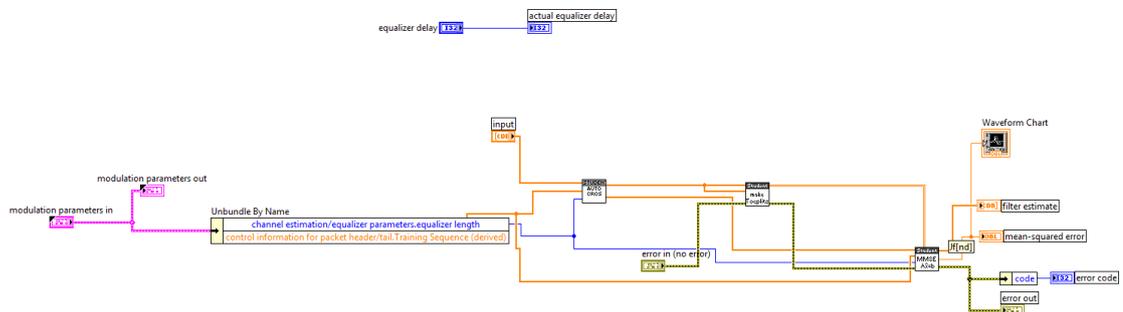


## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL MMSE

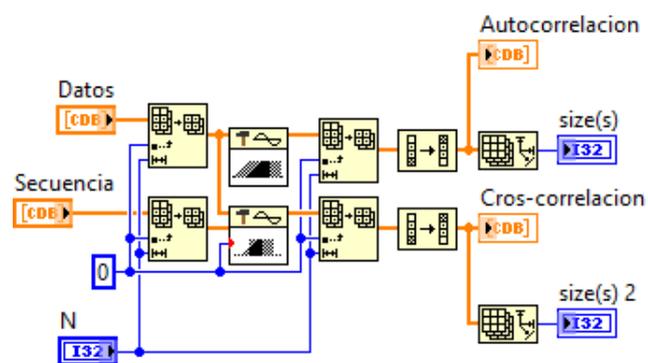


## ANEXO 5

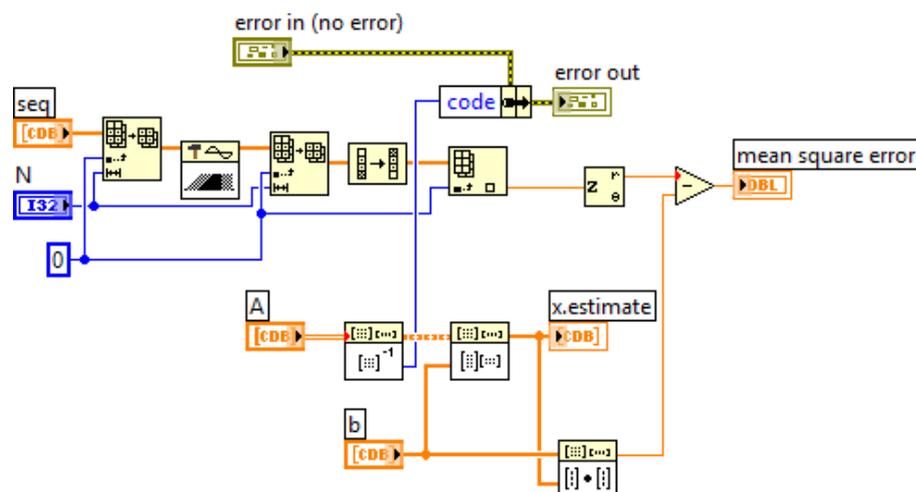
## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL ECUALIZADOR WIENER



## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL BLOQUE DE AUTOCORRELACION

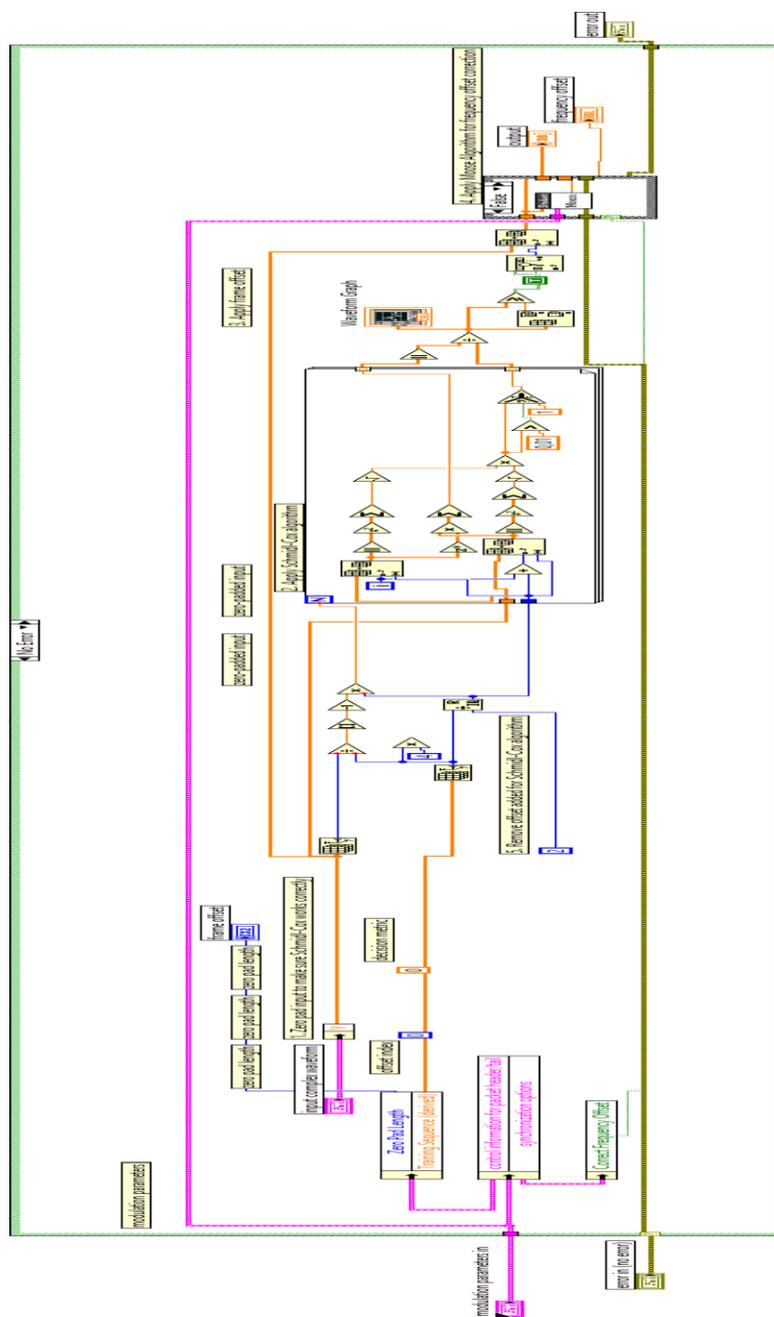


## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL BLOQUE DE MMSE



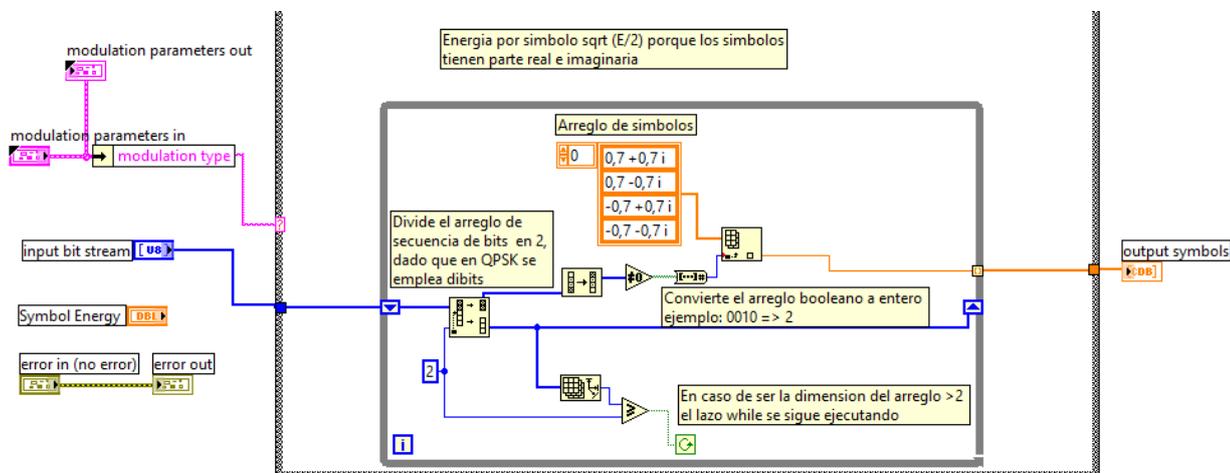
## ANEXO 5

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL SINCRONIZADOR

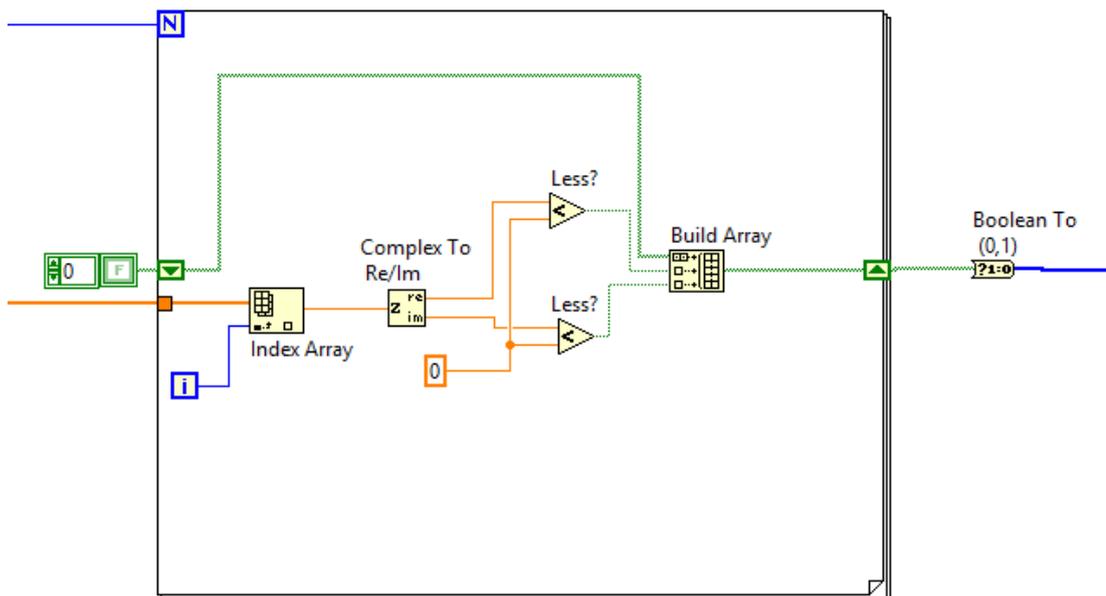


## ANEXO 6

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL MODULADOR QPSK

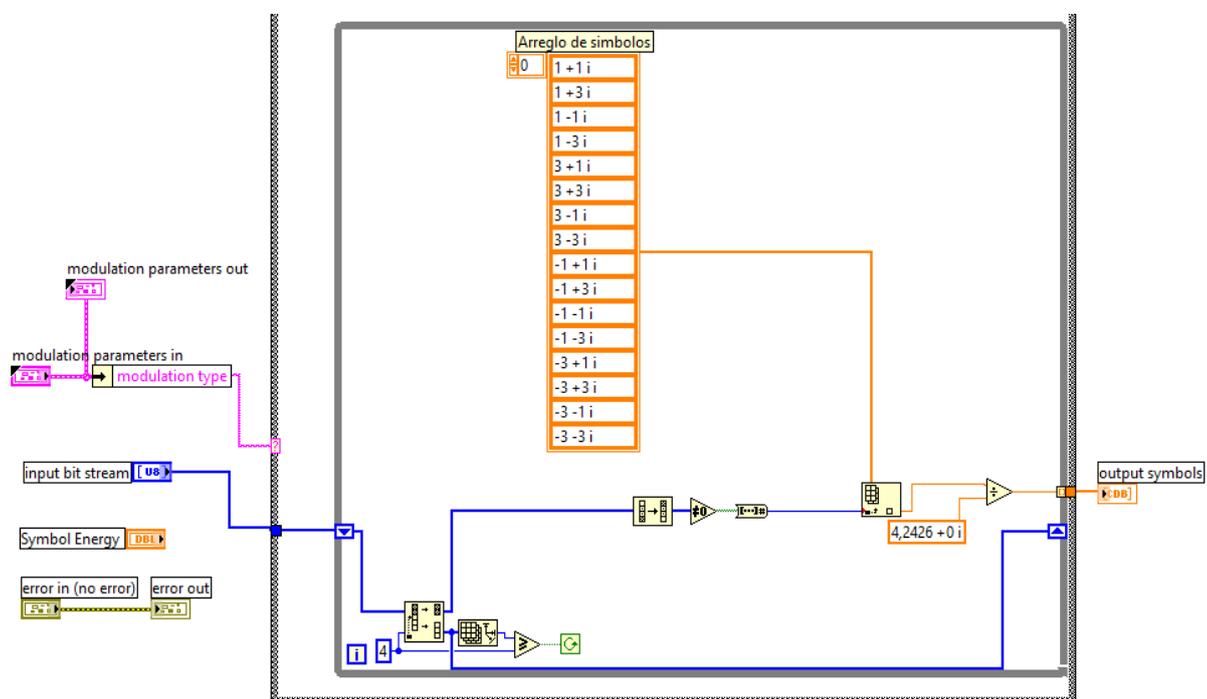


## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DEMODULADOR QPSK



## ANEXO 7

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL MODULADOR 16-QAM



## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DEMODULADOR 16-QAM

