



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ECUALIZADORES DIRECTO Y ZERO  
FORCING EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO  
HACIENDO USO DE SECUENCIAS DE ENTRENAMIENTO BARKER Y  
WILLARD”**

**EXAMEN COMPLEXIVO, COMPONENTE PRÁCTICO**

**INFORME DE PROYECTO**

Previa a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

**Ing. Xavier Omar Ashby Solís**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco por toda la paciencia y apoyo recibido de parte de mi esposa Betzy y mi hijo Bruno.

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro alcanzado de forma especial a Dios, a mi esposa, a mi hijo, a mis padres y mi abuela.

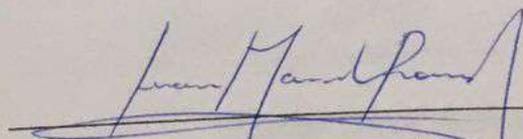
## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

M.Sc. Washington Adolfo Medina Moreira

**EVALUADOR**



---

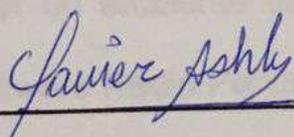
M.Sc. Juan Manuel Romero Arguello

**EVALUADOR**

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

Art. 12 del Reglamento de Graduación.



Xavier Omar Ashby Solís

C.I.: 0919079863

## RESUMEN

En este artículo nos enfocaremos en los métodos para la modulación específicamente en la modulación en Fase Q-PSK y 8-PSK.

Se usará secuencias de entrenamiento, en especial los códigos Barker y Willard con longitudes diferentes, longitud 7 y longitud 11, para mitigar los efectos del canal sobre la señal transmitida. Para que en el receptor se pueda realizar la sincronización de trama usando el método de Moose.

Para la ecualización se utilizarán los métodos de ecualización Directa/Zero Forcing y con ello poder demodular de forma correcta y obtener la señal transmitida.

Para reflejar lo expresado se utilizará la técnica de simulación en el programa LabView y para tener un ambiente de laboratorio se utilizarán los equipos USRP (Universal Software Radio Peripheral).

*Palabras claves: Q-PSK, 8-PSK, secuencias de entrenamiento, Moose, Barker, Willard.*



## CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	III
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	V
<b>CONTENIDO</b> .....	7
<b>ABREVIATURAS</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	12
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	15
1.1. Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas .....	15
1.2. Transmisión de Video .....	17
1.3. Esquemas de Modulación [2].....	18
1.3.1. Modulación PSK (Phase-Shift Keying).....	19
1.3.2. Modulación 8 PSK (Phase-Shift Keying).....	21
1.4. Canales Inalámbricos [3] .....	22
1.4.1. Canales Multipasos .....	22
1.4.2. Canales Multipaso utilizados en el Proyecto.....	22
1.5. Secuencia de Entrenamiento [4].....	23
1.5.1. Códigos Baker .....	24
1.5.2. Códigos Willard .....	25
1.6. Sincronización de Trama [1] .....	25

1.7. Ecuación.....	26
1.7.1. Ecuación Directa .....	27
1.7.2. Ecuación Zero Forcing (Forzador Cero) [5].....	29
<b>2. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
2.1. Power Delay Profile de los diferentes tipos de canales .....	33
2.2. Verificación del desempeño del Sistema .....	36
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</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>IDCT</b>	Transformada inversa 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 comunicación digital.....	16
Fig. 2. Diagrama de bloque del procesamiento de la señal de Video .....	17
Fig. 3. Herramientas Vision and Motion utilizadas en Captación de Video ..	17
Fig. 4. Señal muestreada en el Transmisor .....	18
Fig. 5. Constelación de la Modulación QPSK .....	20
Fig. 6. Modulación 8-PSK .....	21
Fig. 7. Equipos del sistema de comunicación implementado para el ambiente de pruebas.....	32
Fig. 8. Power Delay Profile – Indoor Oficina A.....	33
Fig. 9. Power Delay Profile – Indoor Oficina B.....	34
Fig. 10. Power Delay Profile – Outdoor Rural A.....	35
Fig. 11. Power Delay Profile – Outdoor Rural B.....	35
Fig. 12. BER vs SNR Comparación Ecualizador Directo – Zero Forcing para modulación Q-PSK en un canal Indoor en oficina.....	36
Fig. 13. BER vs SNR Comparación Ecualizador Directo – Zero Forcing para modulación 8-PSK en un canal Indoor en oficina .....	37
Fig. 14. BER vs SNR Comparación Secuencias de Entrenamiento para un Canal Outdoor Rural A – ecualizador Directo y modulación Q-PSK.....	38
Fig. 15. BER vs SNR Comparación Secuencias de Entrenamiento para un Canal Outdoor Rural A – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK....	39
Fig. 16. BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Simulado – ecualizador Directo y modulación Q-PSK.....	41
Fig. 17. BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Simulado – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK.....	41
Fig. 18. BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK.....	42

Fig. 19. BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK.....	42
Fig. 20. BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Simulado – ecualizador Directo y modulación Q-PSK.....	43
Fig. 21. BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Simulado – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK.....	44
Fig. 22. BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Real – ecualizador Directo y modulación Q-PSK .....	44
Fig. 23. BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK.....	45
Fig. 24. Rb vs SNR .....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Canales Indoor - Oficinas.....	23
Tabla 2. Canales Outdoor – Areas Rurales .....	23
Tabla 3. Secuencias Barker .....	24
Tabla 4. Secuencias Willard.....	25

## INTRODUCCIÓN

Todo sistema de telecomunicaciones que usa como medio de transmisión el aire sufre de desvanecimiento; a más de esto está propenso a desplazamiento en frecuencia, y si existe movimiento entre el transmisor y receptor y debido a la no sincronización entre ambos, al ser transmitido por un ambiente real se verá afectado por componentes multipaso.

Para mitigar todos estos eventos producidos sobre una señal transmitida se han desarrollado diferentes procedimientos que son capaces de mejorar los sistemas de comunicación.

Actualmente los sistemas de comunicación digital son 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 comunicaciones digitales pueden proporcionar una mejor calidad comparada con 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]

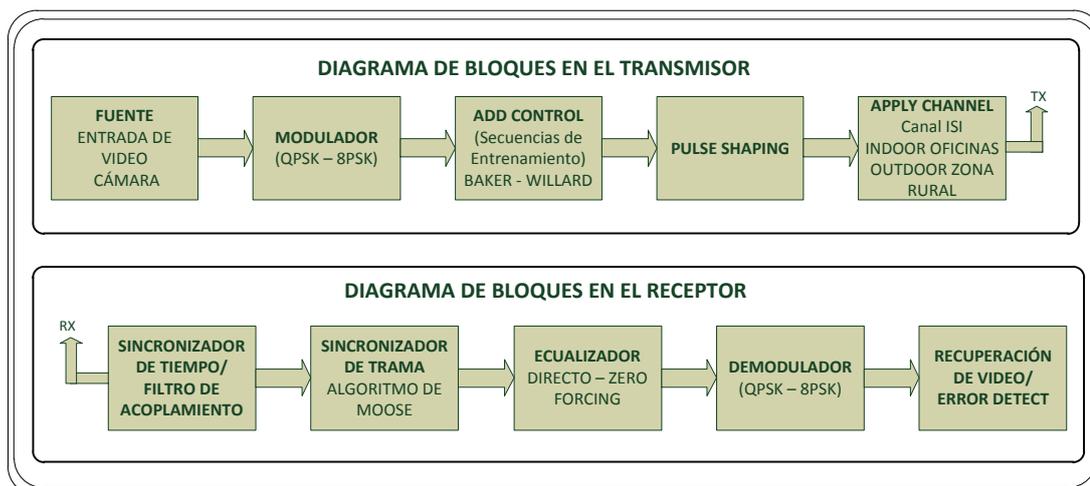
# 1. MARCO TEÓRICO

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

## 1.1. Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas

Un sistema de comunicación inalámbrica es aquel sistema donde el transmisor y el receptor no se encuentran unidos por un medio de propagación físico guiado, si no que la comunicación entre sus extremos es por medio de ondas electromagnéticas moduladas a través del aire.

En los sistemas de comunicaciones digitales se transfiere información de una fuente digital al receptor adecuado. Varios tipos de fuentes pueden unirse y ser transmitidos sobre un sistema digital común de transmisión. La fuente de información puede ser de tipo analógico como digital. En Figura 1 se muestra las etapas que se va a desarrollar en este proyecto.



**Fig. 1.** Elementos de un sistema de comunicación digital

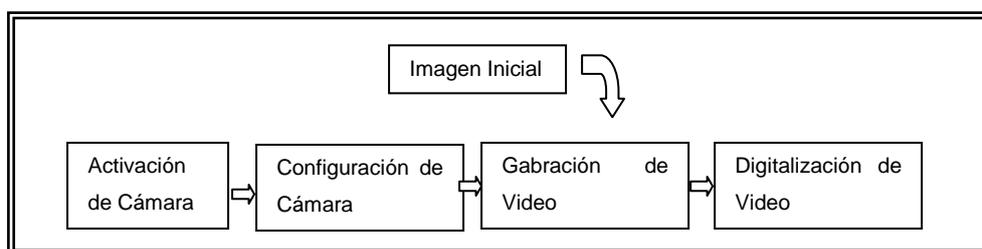
El primer bloque corresponde a los datos de una fuente digital de información, para este estudio se trata de una señal de video captada desde una cámara y también se realiza el proceso de digitalización de la misma. En el siguiente bloque se encuentran la etapa de modulación de la señal (QPSK y 8-PSK), luego en add control se encuentran las secuencias de entrenamiento y al final el canal a ser simulado. Entre el transmisor y el receptor se encuentra el medio de transmisión o el canal de comunicación por donde se propagará la información, en nuestro caso es el aire, siendo afectados por el ruido y otros factores característicos de ambientes interiores y exteriores. Para ver en detalle el VI implementado para el Transmisor Ver Anexo 1 y para el receptor ver el Anexo 5.

Se encuentran los sincronizadores de trama que permiten encontrar el inicio de la trama recibida para luego proceder a la ecualización de la

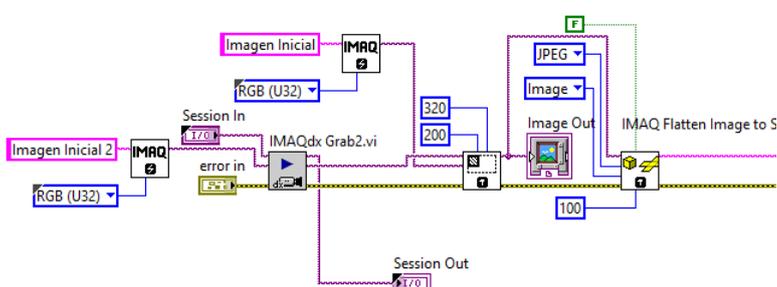
señal; luego de esto se procede con la ecualización de la señal ya sincronizada antes de que pase al demodulador y luego a la recuperación del video.

## 1.2. Transmisión de Video

Para transmitir Video se basa en el mismo sistema anteriormente mostrado con una fuente, un transmisor, un medio y un receptor. Tal como se muestra en la figura 2.

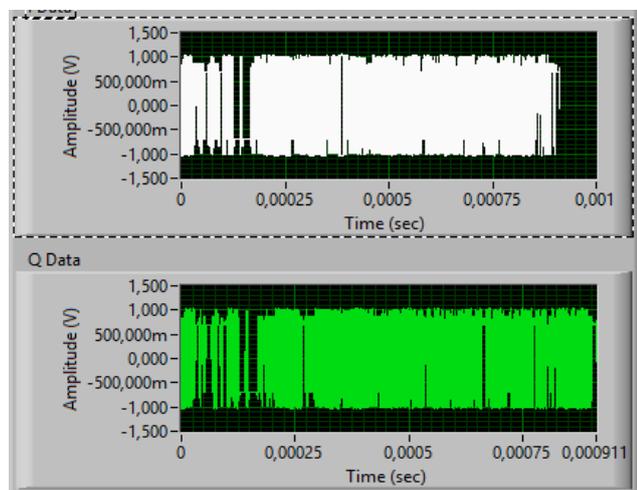


**Fig. 2.** Diagrama de bloque del procesamiento de la señal de Video



**Fig. 3.** Herramientas Vision and Motion utilizadas en Captación de Video

En la figura 4 se observa la señal de video al momento de ser enviada por el canal. Para mayor detalle del VI implementado para la captura del video Ver Anexo 2.



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

### 1.3. Esquemas de Modulación [2]

La modulación consiste en llevar información de una fuente, sobre una señal pasaban da con una frecuencia de portadora, cambiando su amplitud, fase o ambas. La señal pasa banda se conoce como señal modulada y la señal fuente como señal moduladora. Es necesario este proceso para enviar una señal fuente a través de un canal o medio de transmisión.

Por el contrario la demodulación consiste en extraer la información de la señal fuente aplicando filtros para la señal moduladora a la salida del canal.

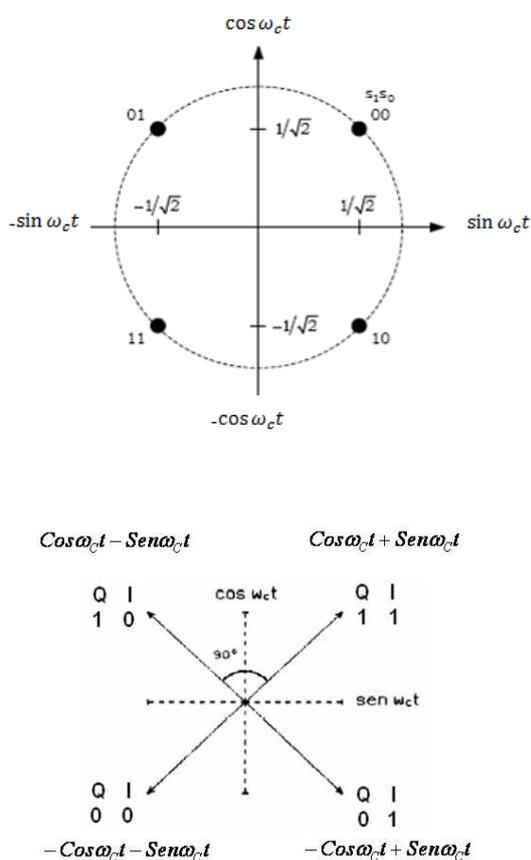
En el presente informe se tratará con mayor detalle la modulación por desplazamiento de fase. Entre los cuales tenemos:

### 1.3.1. Modulación PSK (Phase-Shift Keying)

Una modulación por desplazamiento de fase (phase shift keying) es una forma de modulación digital angular de amplitud constante donde la portadora varía de forma proporcional a la señal de información fuente. En PSK la señal de entrada es una señal digital binaria que tiene una cantidad limitada de fases de salida.

En una modulación digital MPSK,  $M=4$ , 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. La amplitud de la señal de la portadora siempre es constante.

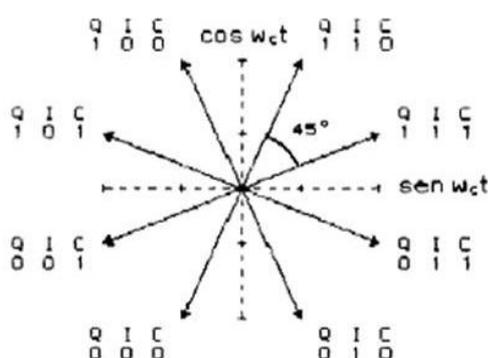
Otro esquema de modulación es QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) O 4-QAM se representa en el diagrama de constelaciones con sus 4 posibles símbolos equidistantes del origen de coordenadas y sus correspondientes dibits. La asignación de bits a cada símbolo se realice mediante el código de Gray donde dos símbolos adyacentes solo cambian en 1 solo bit, con lo que se disminuye la tasa de errores. En la figura 5 se muestra el diagrama de constelación y los símbolos posibles.



**Fig. 5.** Constelación de la Modulación QPSK

### 1.3.2. Modulación 8 PSK (Phase-Shift Keying)

Un PSK de ocho fases (8-PSK), es una técnica para codificar M-ario en donde  $M=8$ . Es decir existen ocho posibles fases de salida. Para codificar ocho fases diferentes, los bits de entrada se consideran en grupos de 3 bits, llamados tribits.



**Fig. 6.** Modulación 8-PSK

En la figura 6 puede verse que la separación angular entre cualquiera de dos fasores adyacentes es de  $45^\circ$ , la mitad de QPSK. Por lo tanto una señal 8-PSK puede experimentar un cambio de fase de casi  $\pm 22.5^\circ$  durante la transmisión y aún tener su integridad. Cada fasor tiene la misma magnitud; la condición tribit se contiene sólo en la fase de la señal. Para ver en detalle el VI implementado para la modulación y demodulación Ver Anexo 1 y 8.

## **1.4. Canales Inalámbricos [3]**

Canal es el término usado para describir al medio de propagación de la señal entre el transmisor y el receptor. 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. Para poder predecir el comportamiento de las señales en un medio impredecible se han desarrollado diferentes modelos de canal inalámbrico.

### **1.4.1. Canales Multipasos**

Son canales donde la propagación de señales ha sido afectada por difracción, dispersión y reflexión, produciendo que la misma llegue al receptor por dos o más trayectorias lo cual produce retrasos en cada componente de señal recibida.

### **1.4.2. Canales Multipaso utilizados en el Proyecto**

A continuación, se detallan los canales multipasos con los cuales se procederá a realizar la experimentación del proyecto. En la tabla 1 se identifican dos canales multipasos cuyas características corresponde a canales interiores en oficinas, donde el Canal A posee dos retardos y el Canal B ocho retardos (dos retardos nulos en 400 y 600 nsec) retardos, cada uno con diferentes retardos y potencia.

**Tabla 1. Canales Indoor - Oficinas**

Canales A		Canales B	
Delay (nsec)	Avg Power (dB)	Delay (nsec)	Avg Power (dB)
0	0	0	0
100	-8.5	100	-3.6
		200	-7.2
		300	-10.8
		500	-18.0
		700	-25.2

En la tabla 2 se identifican dos canales multipasos cuyas características corresponde a canales Outdoor en áreas rurales, donde el Canal A posee 4 retardos y el Canal B 6 retardos, cada uno con diferentes tiempos y amplitudes.

**Tabla 2. Canales Outdoor – Areas Rurales**

Canales A		Canales B	
Delay (nsec)	Avg Power (dB)	Delay (nsec)	Avg Power (dB)
0	0	0.0	0
0.2	-2.0	0.1	-4.0
0.4	-10.0	0.2	-8.0
0.6	-20.0	0.3	-12.0
		0.4	-16.0
		0.5	-20.0

### 1.5. Secuencia de Entrenamiento [4]

Es un patrón de bits que poseen buenas propiedades de auto-correlación y correlación cruzada pre-establecidas tanto en el transmisor como en el

receptor, las cuales son insertadas al inicio de los datos modulados, con el objetivo de estimar los coeficientes del filtro y del canal, a utilizarse 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. Códigos Baker

Las secuencias o códigos Barker del tipo binario están compuestas por una sucesión de  $-1$ 's y  $+1$ 's de una longitud finita  $L$ , tal que su función de auto-correlación cumple que  $\{C[i]|\leq 1\}$  para  $i \neq 0$ . Estas secuencias pueden ampliarse al campo complejo si cada uno de los términos de la misma son números complejos con un módulo igual a 1.

Para la ejecución de este proyecto se utilizó las secuencias de código Barker de longitud 7 y de longitud 11, como se aprecia en la Tabla 1.

**Tabla 3.** Secuencias Barker

Longitud código	Secuencia de Barker	
<b>2</b>	[- +, - -]	-1+1-1-1
<b>3</b>	[- - - +]	-1-1-1+1
<b>4</b>	[- + - -, - + + +]	-1+1-1-1, -1+1+1+1
<b>5</b>	[- - - + -]	-1-1-1+1-1
<b>7</b>	[- - - + + - +]	-1-1-1+1+1-1+1
<b>11</b>	[- - - + + + - + + - +]	-1-1-1+1+1+1-1+1+1-1+1
<b>13</b>	[- - - - - + + - - + + - + -]	

Estas secuencias se modularán con igual esquema la modulación con los que se modulan los bits de datos.

### 1.5.2. Códigos Willard

Al igual que los códigos Barker, las secuencias de entrenamiento utilizando el código Willard, están compuestas por una sucesión de  $-1$ 's y  $+1$ 's de una longitud finita  $L$ , tal que su función de auto-correlación cumple que  $\{C[i]_{|i| \leq 1}\}$  para  $i \neq 0$ .

**Tabla 4.** Secuencias Willard.

Longitud código	Secuencia de Willard	
<b>7</b>	[- - - - + - + +]	-1-1-1+1-1+1+1
<b>11</b>	[- - - + - - + - + + +]	-1-1-1+1-1-1+1-1+1+1+1

Para ver en detalle el VI implementado para la implementación de las secuencias de entrenamiento Ver Anexo 4.

### 1.6. Sincronización de Trama [1]

La sincronización de trama resuelve los retrasos que son múltiplos del periodo de símbolo, la misma se debe determinar el inicio de la trama encontrando una referencia conocida en la señal transmitida.

Antes de las operaciones en la recepción como la estimación de canal y ecuación. La sincronización de trama se enfoca mucho en las

propiedades de correlación y periodicidad de la secuencia de entrenamiento.

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.

$$\hat{d} = \arg \max \frac{\sum_{n=L}^{N_t-1} y[n+d+N_t]y^*[n+d]}{\sqrt{\sum_{n=L}^{N_t-1} |y[n+d]|^2} \sqrt{\sum_{n=L}^{N_t-1} |y[n+d+N_t]|^2}}.$$

En este proyecto haremos uso de algoritmo de Moose Auto referenciado, para ver el VI desarrollado ver Anexo 6.

### 1.7. Ecuación

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. Ecualesadores diseñados específicamente para la corrección de múltiples trayectos a menudo se denominan de eco-canceladores.

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.

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: Ecualizador Directo y Ecualizador Zero Forcing.

### **1.7.1. Ecualizador Directo**

El diseño de un ecualizador directo que estime la secuencia recibida es más eficiente que utilizar técnicas de estimación y ecualización de canal, en esta técnica solo se necesita resolver un problema de estimación de mínimos cuadrados simple por lo que el ecualizador es encontrado

directamente de las secuencias de datos de entrenamiento observados, siendo más robusta al ruido.

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

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

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  $n = n_d, n_d + 1, \dots, n_d + N_t$ . Al reestructurar la ecuación con la secuencia de entrenamiento conocida.

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

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

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

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

La solución de los mínimos cuadrados es:

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

El error cuadrático puede ser medido como:

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

Para que el error cuadrático se minimice  $J_f[n_d]$ . La secuencia de entrenamiento  $n_d$  debe ser mayor. 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  $L_f \leq N_t - 1$ . Para ver el VI implementado ver Anexo 7.

### 1.7.2. Ecualizador Zero Forcing (Forzador Cero) [5]

Se refiere a una forma de algoritmo de ecualización lineal utilizado en sistemas de comunicación que aplica la inversa de la respuesta de frecuencia del canal a la señal recibida para restaurarla después del paso del canal. Esta forma de ecualizador fue propuesta por primera vez por Robert Lucky.

Tiene muchas aplicaciones útiles. Por ejemplo, se estudia en gran medida para IEEE 802.11n (MIMO) donde conocer el canal permite la

recuperación de los dos o más flujos que se recibirán unos encima de otros en cada antena. El nombre Zero Forcing corresponde a reducir la interferencia entre símbolos (ISI) a cero en un caso sin ruido. Esto será útil cuando el ISI es significativo comparado con el ruido.

Para un canal con respuesta de frecuencia  $F(f)$  el ecualizador  $C(f)$  es construido por  $C(f) = 1/F(f)$ . De tal manera que la combinación del canal y el ecualizador dan una respuesta de frecuencia plana y una fase lineal  $F(f)C(f) = 1$ .

En realidad, la igualación de cero-forzamiento no funciona en la mayoría de las aplicaciones, por las siguientes razones:

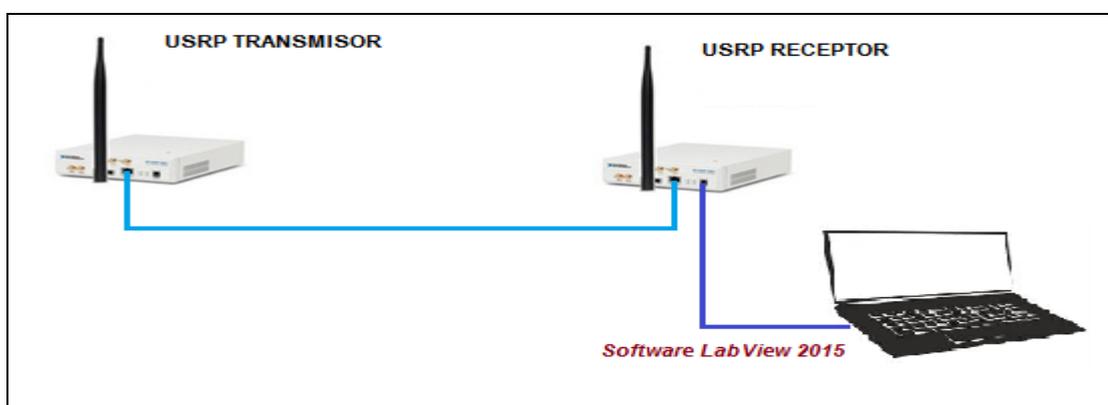
- La respuesta de impulso de canal tiene una longitud finita, la respuesta de impulso del ecualizador debe ser infinitamente larga.
- En algunas frecuencias la señal recibida puede ser débil. Para compensar, la magnitud del filtro forzador de cero (Zero Forcing) ("ganancia") crece. Como consecuencia, cualquier ruido añadido después de que el canal recibe impulso por un factor importante y destruye la relación total señal a ruido. Además, el canal puede tener ceros en su respuesta de frecuencia que no se pueden

invertir en lo absoluto. (Ganancia \* 0 = 0). Este segundo elemento es a menudo la condición más limitante. Estos problemas se abordan en el ecualizador MMSE (Minimum Mean Square Error ó Error cuadrático medio mínimo) lineal haciendo una pequeña modificación al denominador de  $C(f): C(f) = 1/(F(f) + k)$  donde  $k$  está relacionada con la respuesta del canal y la señal SNR. Para ver el VI implementado ver Anexo 7.

## 2. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para lograr realizar la experimentación del proyecto explicado en el capítulo anterior, es necesario la utilización de equipamiento de laboratorio como lo son los equipos NI USRP-2320, laptop con el software LabView versión 2015 con el complemento Vision and Motion para trabajar con el video.

Para lograr la ejecución del proyecto en un ambiente simulado real, es necesario contar con dos equipos USRP, uno como transmisor y otro como receptor, y cada uno de ellos debe contar con una antena. Con un cable UTP se realiza la conexión entre el USRP y la laptop y entre los USRP se realiza la conexión con un cable MIMO, todo esto para el envío de los códigos generados en labview. Un esquema de conexión del equipamiento se muestra en la figura figura 7.



**Fig. 7.** Equipos del sistema de comunicación implementado para el ambiente de pruebas.

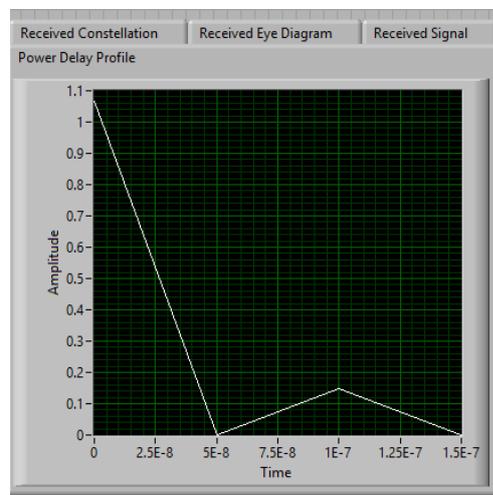
## 2.1. Power Delay Profile de los diferentes tipos de canales

Una de las principales formas para realizar el análisis de sistemas de comunicación es el uso de la respuesta impulso del sistema; con esto podemos obtener información acerca de los múltiples caminos a la que son sometidas las diferentes señales. Para este proyecto hacemos uso de dos diferentes escenarios que son:

- Canales Indoor – Residenciales
- Canales Outdoor – Áreas Rurales

A continuación, se mostrará el power delay profile para cada uno de los canales en los cuales será sometida la señal transmitida desde los USRP:

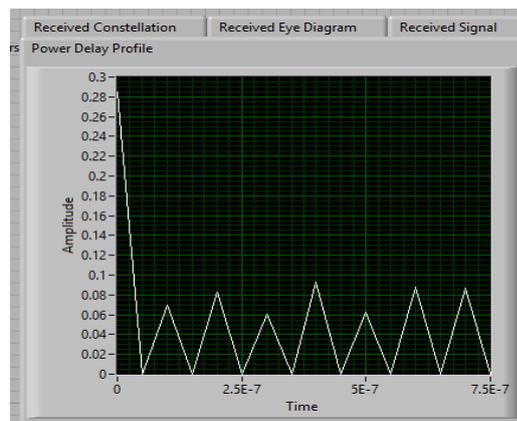
Canales Indoor – Oficinas A:



**Fig. 8.** Power Delay Profile – Indoor Oficina A

En la figura 8 se puede observar la presencia de dos componentes de señal (pasos) con una separación de 0.1 useg, donde una cuenta con una mayor amplitud que otra, en el sistema.

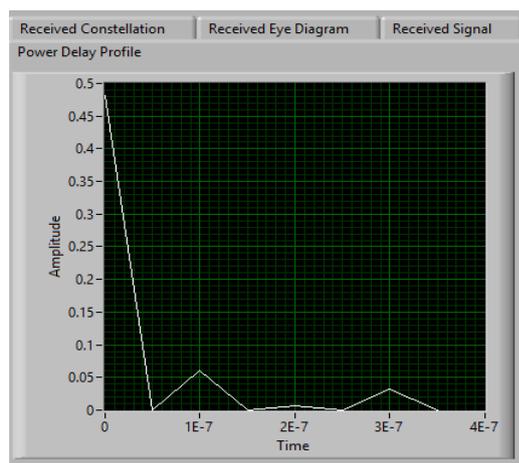
#### Canales Indoor – Oficinas B



**Fig. 9.** Power Delay Profile – Indoor Oficina B

En la figura 9 se puede observar la presencia de ocho componentes de señal (pasos), con una separación de 0.1 useg, donde una cuenta con la mayor amplitud en el sistema.

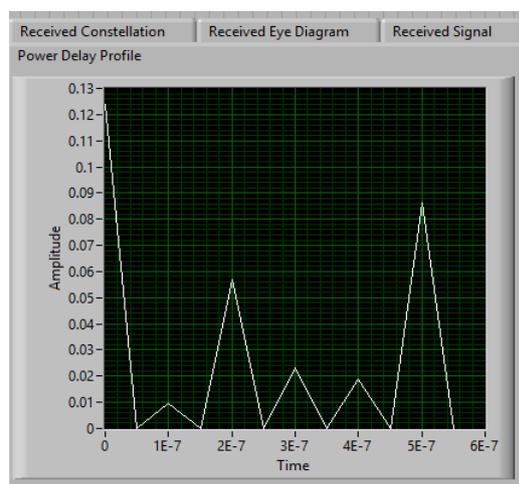
#### Canales Outdoor – Areas Rurales A



**Fig. 10.** Power Delay Profile – Outdoor Rural A

En la figura 10 se puede observar la presencia de cuatro componentes de señal (pasos) con una separación de 0.1 useg, donde una cuenta con la mayor amplitud en el sistema

Canales Outdoor – Areas Rurales B

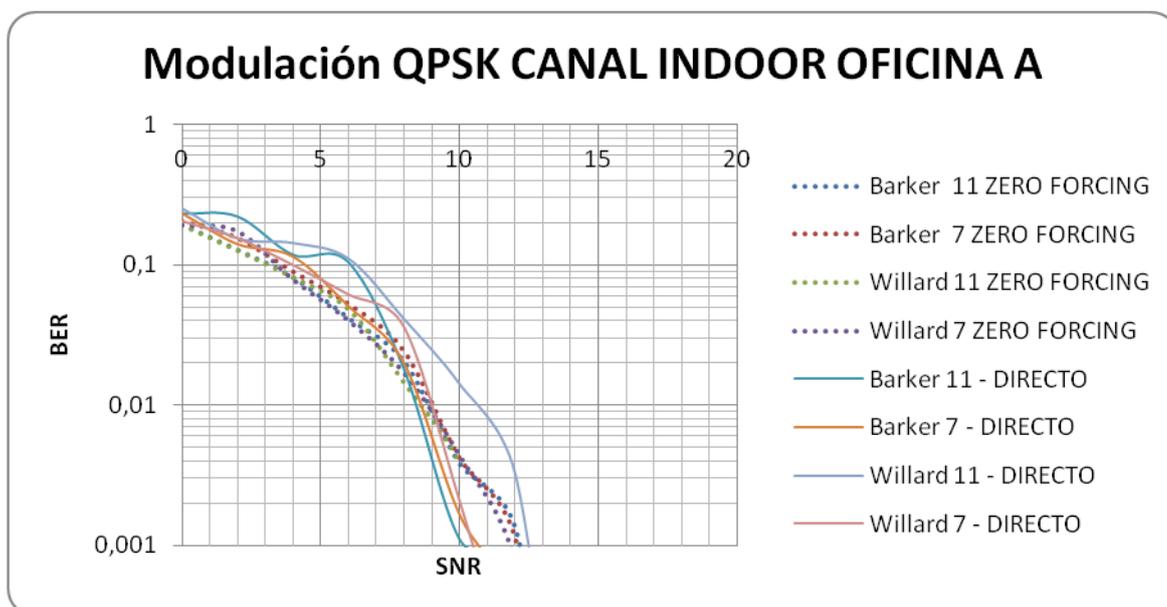


**Fig. 11.** Power Delay Profile – Outdoor Rural B

En la gráfica se puede observar la presencia de seis componentes de señal (pasos), donde una cuenta con la mayor amplitud en el sistema.

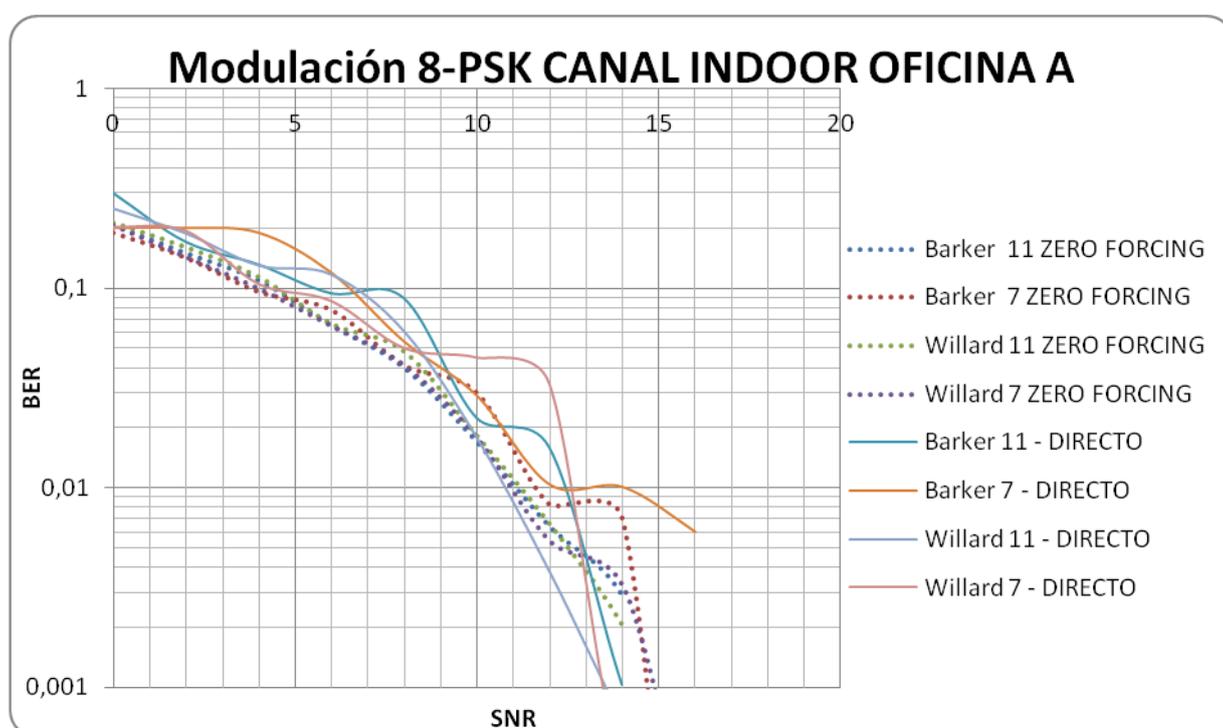
## 2.2. Verificación del desempeño del Sistema

Desempeño a diferentes esquemas de Modulación: En la figura 12 se puede observar el desempeño del sistema para un esquema de modulación QPSK para un canal Indoor en oficina y cuatro diferentes secuencias de entrenamiento.



**Fig. 12.** BER vs SNR Comparación Ecuilizador Directo – Zero Forcing para modulación Q-PSK en un canal Indoor en oficina

En la figura 13 se puede observar el desempeño del sistema para un esquema de modulación 8-PSK para un canal Indoor en oficina y cuatro diferentes secuencias de entrenamiento.

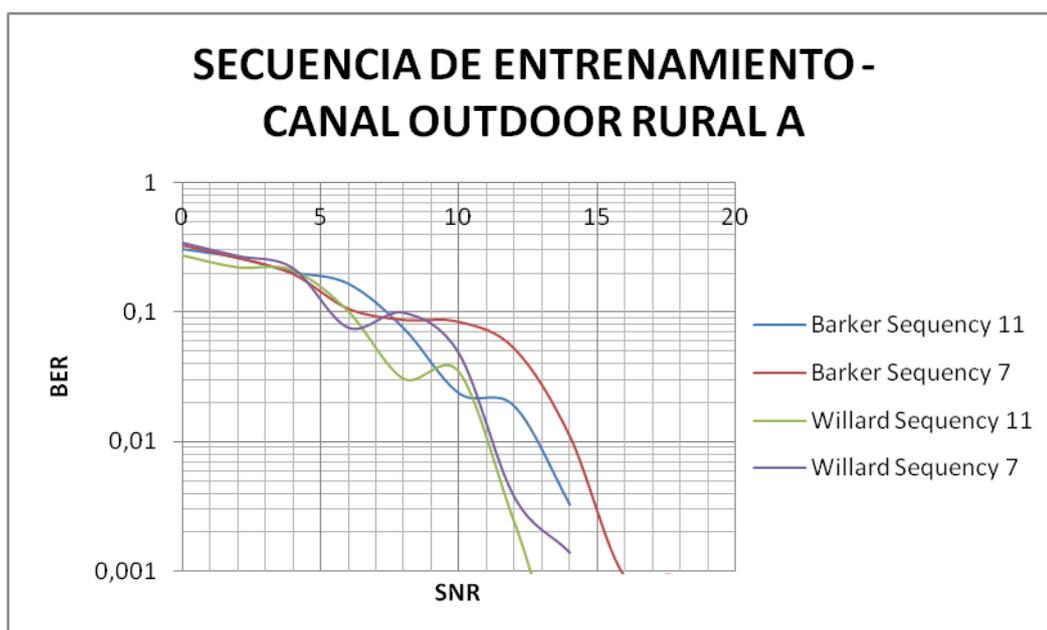


**Fig. 13.** BER vs SNR Comparación Ecualizador Directo – Zero Forcing para modulación 8-PSK en un canal Indoor en oficina

En las dos gráficas anteriores, se puede apreciar como una modulación QPSK tiene una mejor respuesta que una modulación 8-PSK, dado que el nivel del BER decae más rápidamente en la modulación QPSK versus el 8PSK.

Por lo cual se concluye que un sistema de modulación con menor cantidad de bits por símbolo es más robusto para un sistema multipase que es afectado por Interferencia Inter Simbólica.

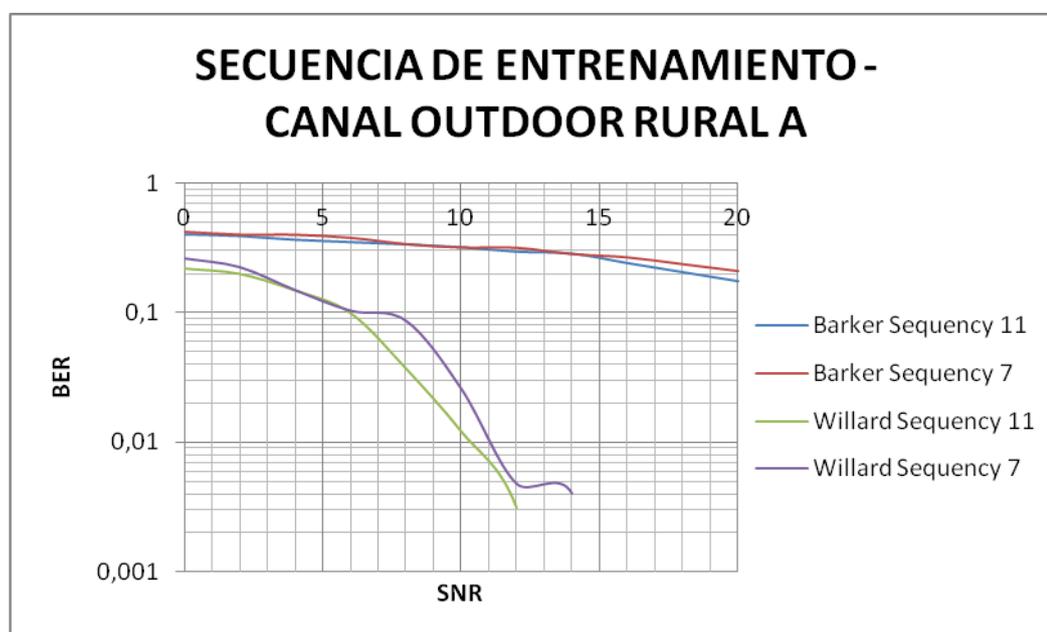
En las figuras 14 y 15 se presenta comparación para diferentes secuencias de entrenamiento para los ecualizadores Directo y Zero Forcing para una modulación QPSK.



**Fig. 14.** BER vs SNR Comparación Secuencias de Entrenamiento para un Canal Outdoor Rural A – ecualizador Directo y modulación Q-PSK

En la figura 14, se observa claramente la diferencia entre las secuencias de entrenamiento utilizadas, ya que, para un ecualizador directo, aunque las respuestas son similares, se observa que en las secuencias de entrenamiento de Willard para longitud 11 y 7, su desempeño es ligeramente

mejor a las secuencias de Barker de longitud 11 y 7. Cabe acotar que la secuencia de entrenamiento de una longitud de 11 tiene mejor desempeño que una de longitud 7.



**Fig. 15.** BER vs SNR Comparación Secuencias de Entrenamiento para un Canal Outdoor Rural A – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK

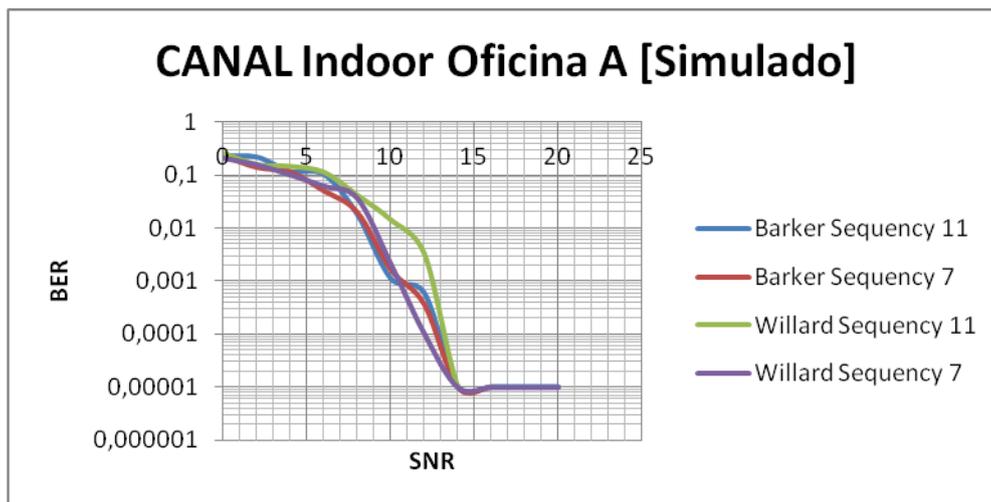
En la figura 15, se observa una diferencia muy marcada entre las secuencias de entrenamiento utilizadas, ya que para un ecualizador Zero Forcing, las secuencias de entrenamiento de Willard para longitud 11 y 7, su desempeño es mejor a las secuencias de Barker de longitud 11 y 7. Cabe acotar que la secuencia de entrenamiento de una longitud de 11 tiene mejor desempeño que una de longitud 7.

## 2.4 Comparación Real vs Simulado

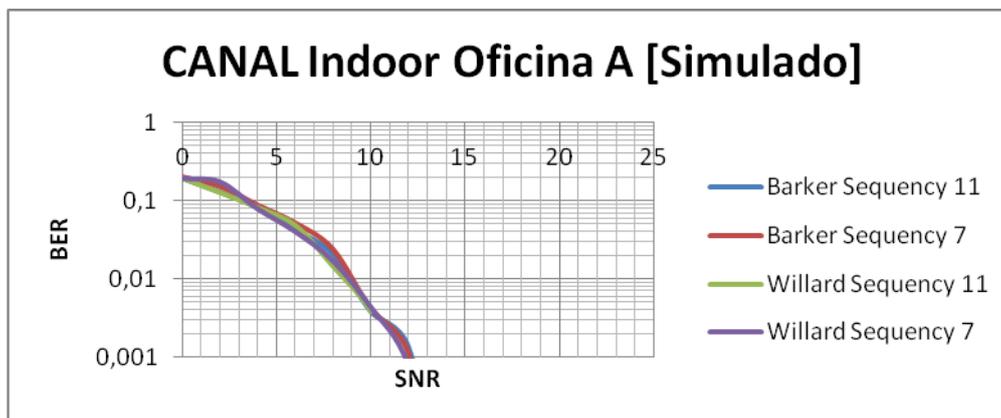
Para realizar la comparación del sistema implementado, se ha realizado la toma de datos en los diferentes canales implementados, Indoor Oficinas y outdoor Rurales para diferentes secuencias de entrenamiento y ecualizador implementado.

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se observa la diferencia existente entre lo simulado y real con un canal Indoor en oficina, para un ecualizador directo en una modulación QPSK, se nota claramente que en un ambiente simulado el desempeño es mucho mejor que en un ambiente real, ya que para alcanza un BER de 0.01 en un ambiente simulado lo alcanza aproximadamente a 10 dB de SNR y en cambio en el ambiente real lo alcanza en aproximadamente a 20 dB de SNR figuras 16 y 18.

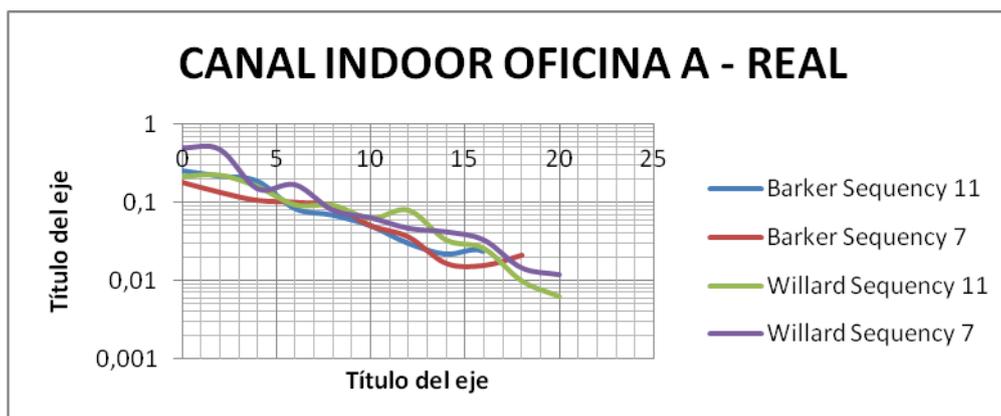
Para un ecualizador Zero Forcing en una modulación QPSK, se nota claramente que en un ambiente simulado el desempeño es mucho mejor que en un ambiente real, ya que para alcanza un BER de 0.01 en un ambiente simulado lo alcanza aproximadamente a 8 dB de SNR y en cambio en el ambiente real lo alcanza en aproximadamente a 20 dB de SNR figuras 17 y 19.



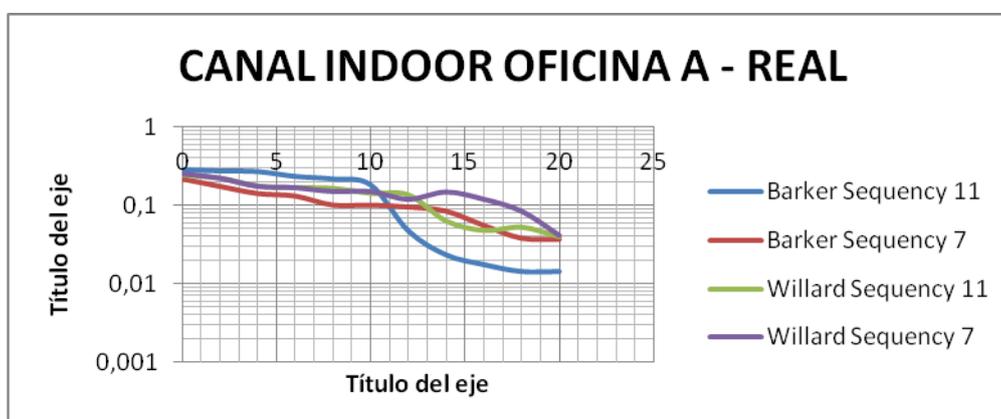
**Fig. 16.** BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Simulado – ecualizador Directo y modulación Q-PSK



**Fig. 17.** BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Simulado – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK



**Fig. 18.** BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK

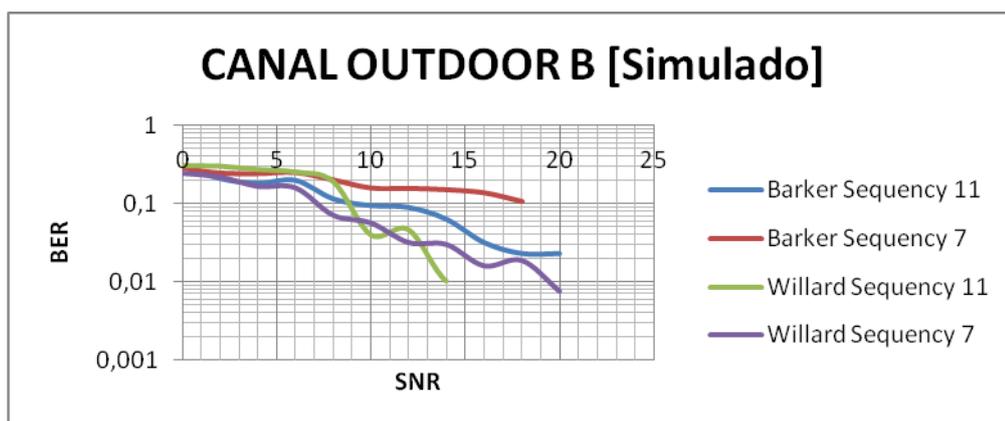


**Fig. 19.** BER vs SNR Canal Indoor Oficina A Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK

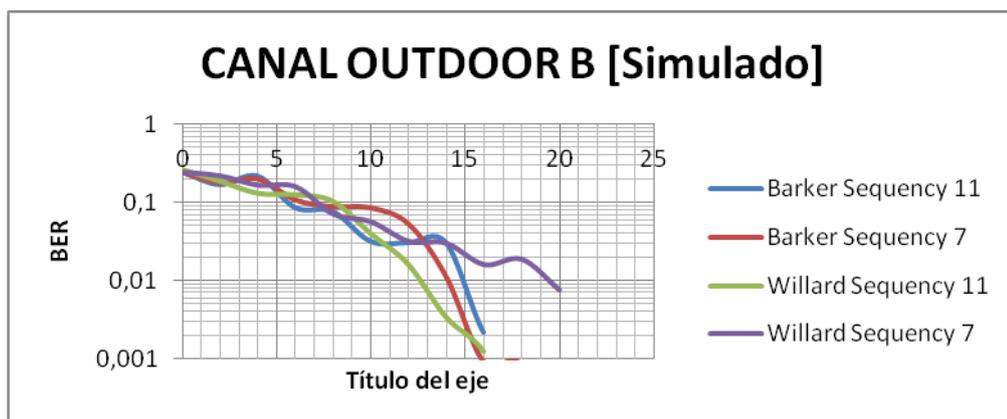
En las figuras 20, 21, 22, 23 se observa la diferencia existente entre lo simulado y real con un canal Outdoor en zona rural, para un ecualizador directo en una modulación QPSK, se nota claramente que en un ambiente simulado el desempeño es mucho mejor que en un ambiente real, ya que

para alcanza un BER de 0.01 en un ambiente simulado lo alcanza aproximadamente a 15 dB de SNR y en cambio en el ambiente real lo alcanza en aproximadamente a 17 dB de SNR figuras 20 y 22.

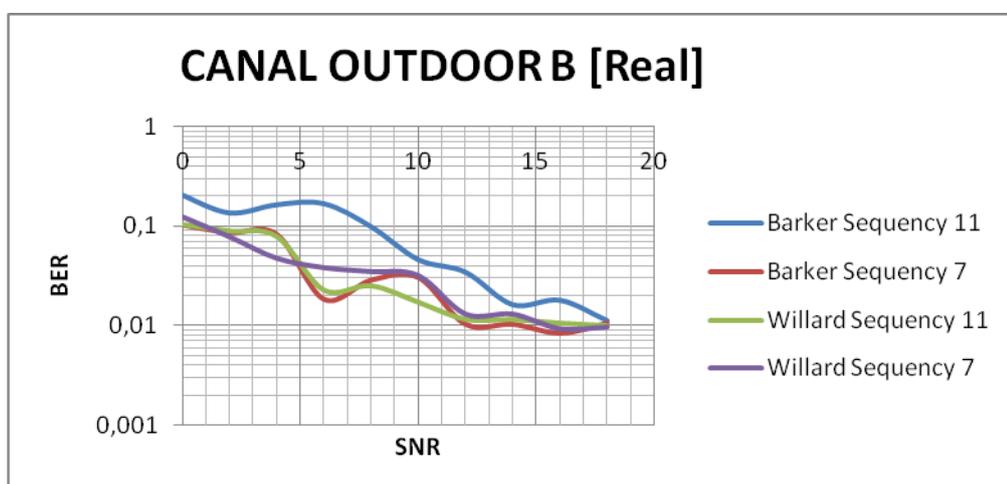
Para un ecualizador Zero Forcing en una modulación QPSK, se nota claramente que en un ambiente simulado el desempeño es mucho mejor que en un ambiente real, ya que para alcanza un BER de 0.01 en un ambiente simulado lo alcanza aproximadamente a 15 dB de SNR y en cambio en el ambiente real lo alcanza en aproximadamente a 15 dB de SNR figuras 21 y 23.



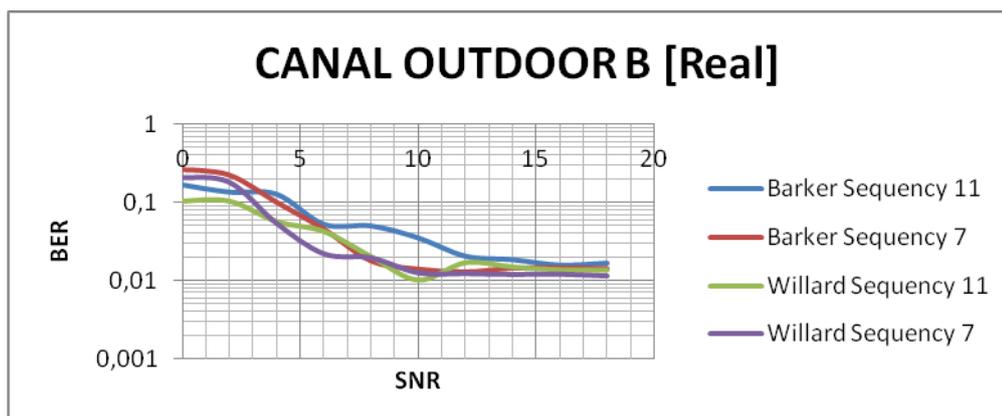
**Fig. 20.** BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Simulado – ecualizador Directo y modulación Q-PSK



**Fig. 21.** BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Simulado – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK



**Fig. 22.** BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Real – ecualizador Directo y modulación Q-PSK



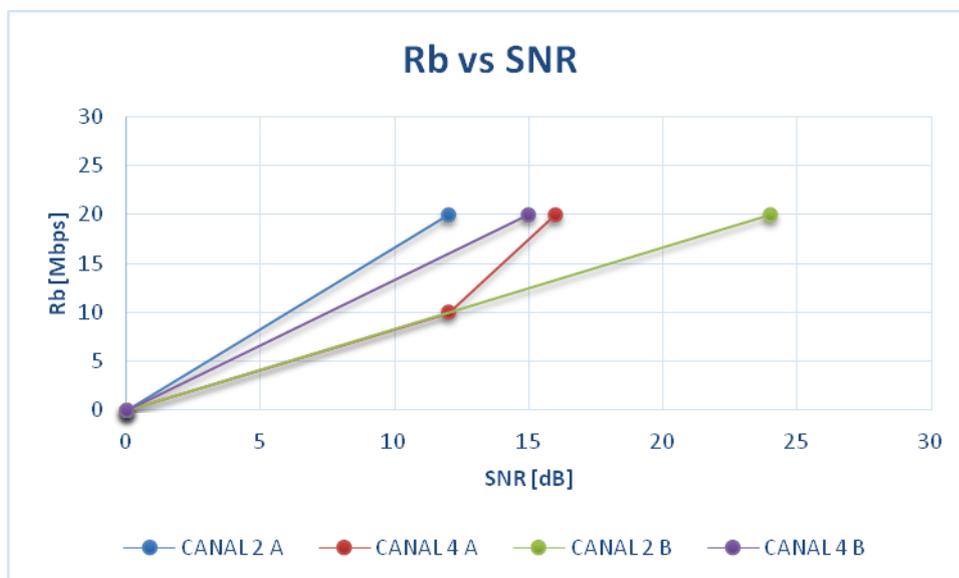
**Fig. 23.** BER vs SNR Canal Indoor outdoor B Real – ecualizador Zero Forcing y modulación Q-PSK

#### 2.4 Comparación Rb vs SNR.

Para realizar una comparación en el desempeño del sistema, se ha realizado la prueba de RB vs SNR, la cual no muestra lo robusto que puede llegar hacer el sistema en cada uno de los canales analizados en el proyecto.

En la figura 16, se muestra el rendimiento (Rb en Mbps) con respecto al nivel de SNR en el sistema, como se puede observar que para que el sistema tenga un rendimiento a 20 Mbps el menor valor de SNR se obtiene para el canal 2<sup>a</sup> (indoor oficina con dos saltos y retardos de 0.1 useg), luego encontramos el canal 4 B (outdoor Rurales con seis saltos y retardos de 0.1 useg), luego está el canal 4 A (outdoor Rurales con cuatro

saltos y retardos de 0.2 useg) y al el canal 2 B (indoor oficina con ocho saltos y retardos de 0.1 useg).



**Fig. 24.** Rb vs SNR

## CONCLUSIONES

- Para los diferentes esquemas de modulación, que son utilizados sobre sistemas de comunicación que son afectados por Interferencia Intersimbólica, pierden efectividad a la hora de recuperar las señales; dado esto es necesario la utilización de esquemas de modulación más robustos para mitigar los efectos del ISI. En conclusión, según se vaya afectando el canal es necesario escoger un esquema de modulación más robusto esto quiere decir que debemos bajar la tasa de transmisión de bit para poder recuperar la señal (mejor rendimiento del modulador QPSK sobre el 8-PSK).
- Las secuencias de entrenamiento son utilizadas para la sincronización en el receptor y por ello se ha visto en este proyecto que las secuencias de entrenamiento con una mayor longitud trabajan de mejor manera que una de longitud menor, por lo cual una secuencia de longitud 11 tiene mejor respuesta que una de longitud 7. Además que dependiendo del canal utilizado las secuencia de Barker o Willard pueden funcionar de mejor manera.

- El ecualizador Zero Forcing presenta un mejor desempeño en un ambiente indoor que en uno outdoor y un ecualizador Directo tiene un desempeño similar tanto en un ambiente indoor como en uno outdoor. A todo esto, de manera general se concluye que el ecualizador Directo tiene mejor desempeño que un ecualizador Zero Forcing.
- El rendimiento ( $R_b$  en Mbps) con respecto al nivel de SNR en el sistema, como se puede observar que para que el sistema tenga un rendimiento a 20 Mbps el menor valor de SNR se obtiene para el canal 2<sup>a</sup> (indoor oficina con dos saltos y retardos de 0.1 useg), luego encontramos el canal 4 B (outdoor Rurales con seis saltos y retardos de 0.1 useg), luego está el canal 4 A (outdoor Rurales con cuatro saltos y retardos de 0.2 useg) y al el canal 2 B (indoor oficina con ocho saltos y retardos de 0.1 useg).
- Luego de analizar los resultados obtenidos en este proyecto, se concluye que para sistemas de comunicación multipaso debemos escoger el esquema de modulación más robusto que me permita la reconstrucción de video; esto depende del canal por el cual se está transmitiendo la señal (el canal depende de la cantidad de caminos y los retardos). La importancia de secuencias de entrenamiento

utilizadas en el transmisor para la sincronización de trama en el receptor antes de que se proceda a la ecualización de la señal, tanto con ecualizador Directo o Zero Forcing, es importante para la posterior ecualización de la señal.

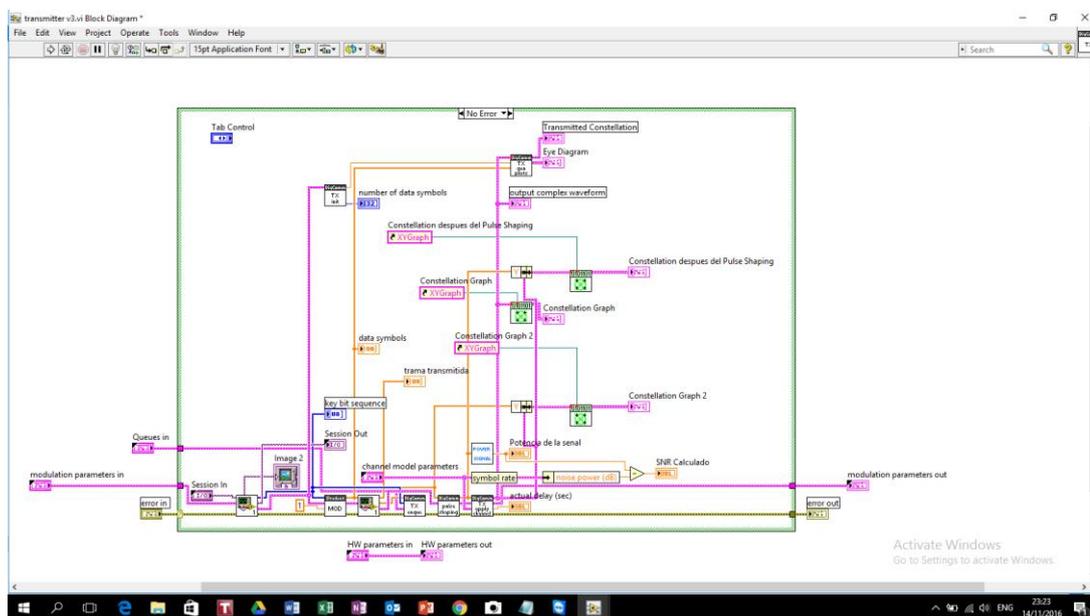
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robert w. Heat Jr. Ph.D., PE. "Digital Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP Platform", National Technology and Science Press.
- [2] León W. Couch, "Sistemas de comunicación digital y analógico" 7ma Ed. Pearson Educación, México, 2008, pp. 5, 18, 19.
- [3] Engst, Adam (2005). Introducción a las redes inalámbricas.
- [4] Golomb, , S.W.; Scholtz, R.A. (octubre de 1965). «Generalized Barker Sequences». IEEE Trans. Information Theory. IT-11: 533-537.
- [5] Jon Mark and Weihua Zhuang (2003). "Ch. 4". Wireless Communications and Networking. Prentice Hall. p. 139. ISBN 0-13-040905-7.
- [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] Jon Mark and Weihua Zhuang (2003). "Ch. 4". Wireless Communications and Networking. Prentice Hall. p. 139 - 143.

# ANEXOS

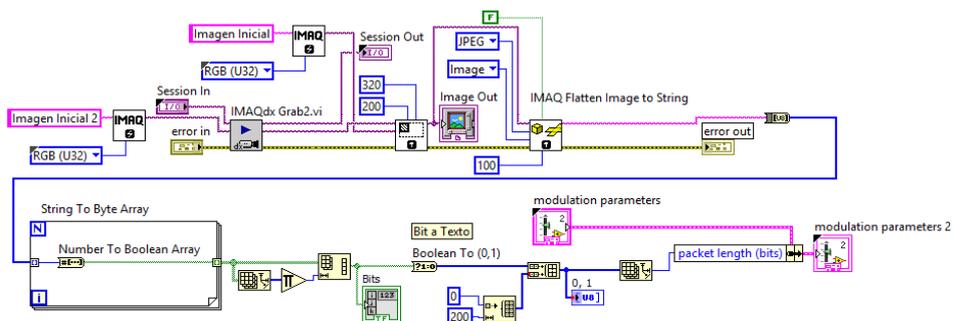
## ANEXO 1

### DIAGRAMA DE BLOQUE VI TRANSMISOR



## ANEXO 2

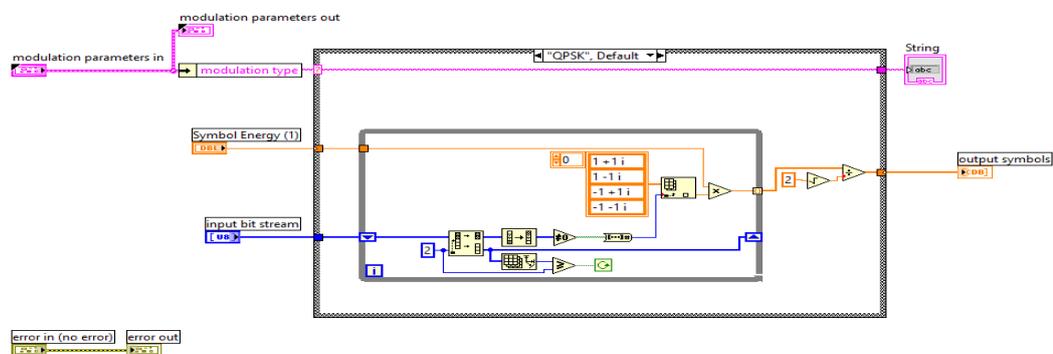
## DIAGRAMA DE BLOQUE VI GENERACION DE VIDEO



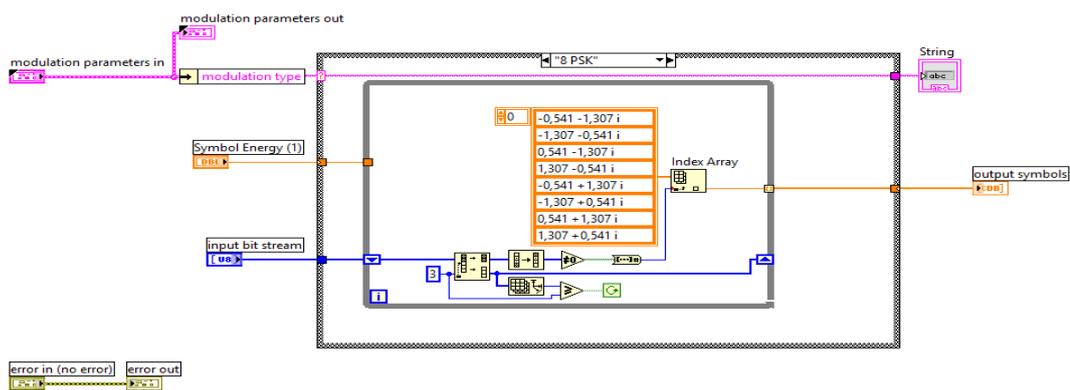
## ANEXO 3

## DIAGRAMA DE BLOQUE VI MODULACION

## MODULACION Q-PSK



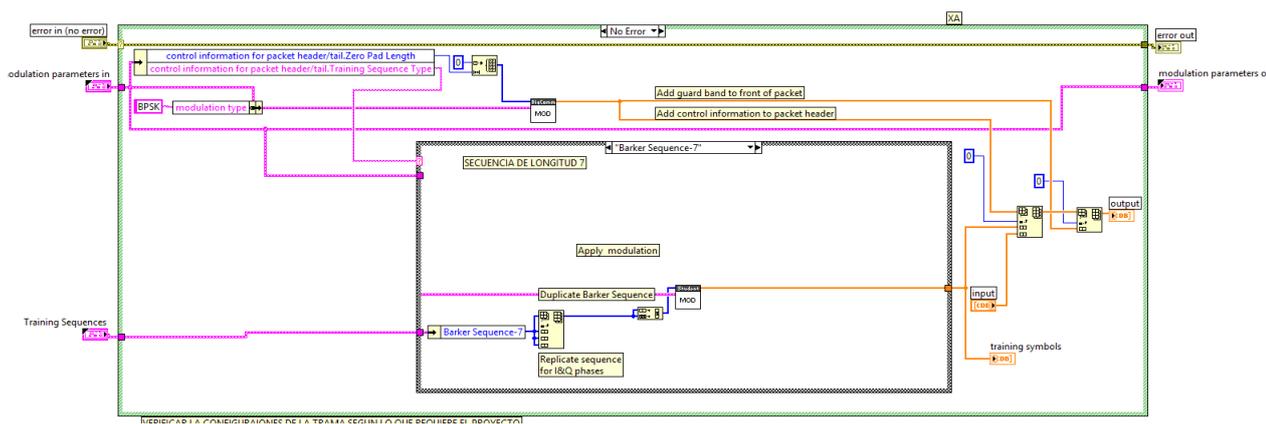
## MODULACION 8-PSK



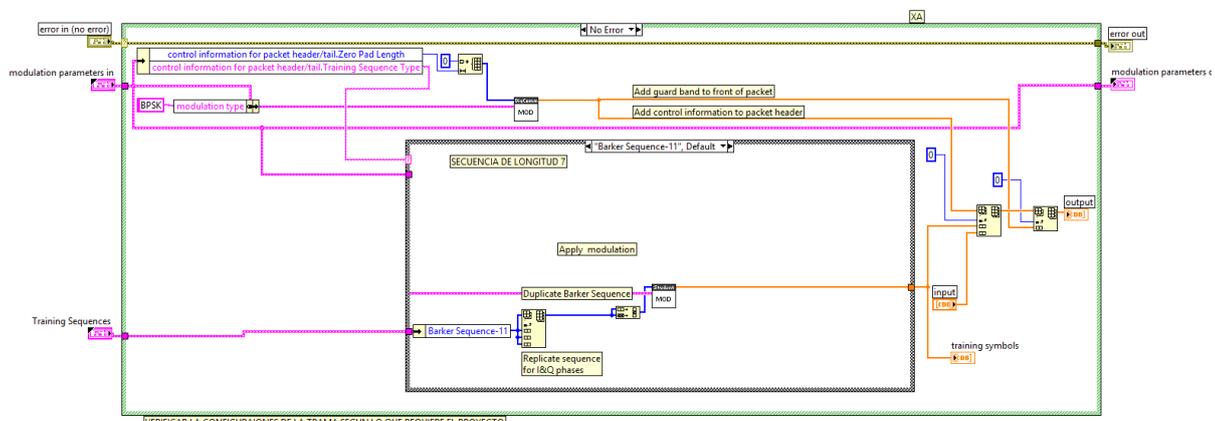
## ANEXO 4

## DIAGRAMA DE BLOQUE VI ADD CONTROL – SECUENCIAS DE ENTRENAMIENTO

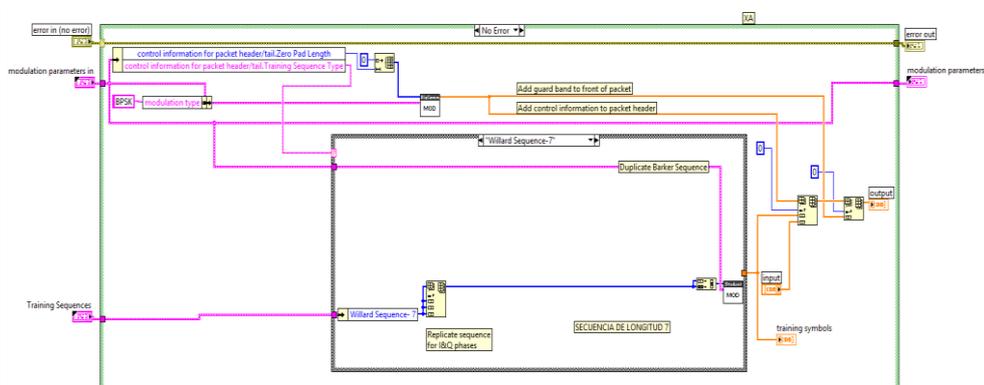
### SECUENCIA BARKER – LONGITUD 7



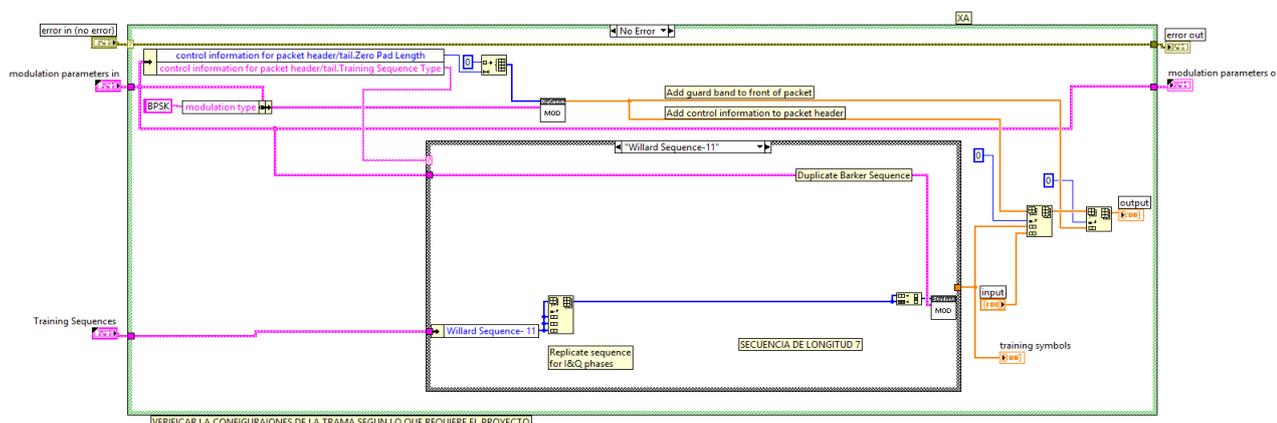
### SECUENCIA BARKER – LONGITUD 11



## SECUENCIA WILLARD – LONGITUD 7

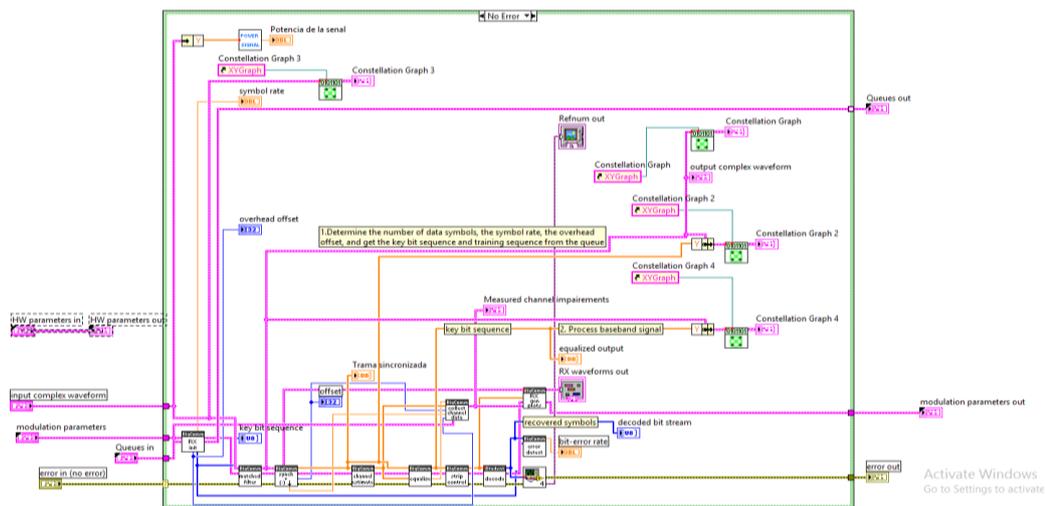


## SECUENCIA WILLARD – LONGITUD 11



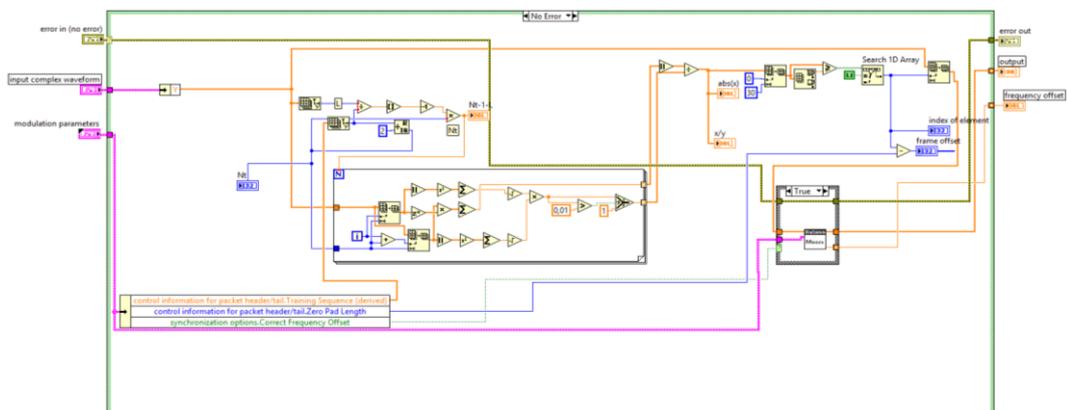
## ANEXO 5

## DIAGRAMA DE BLOQUE VI RECEPTOR



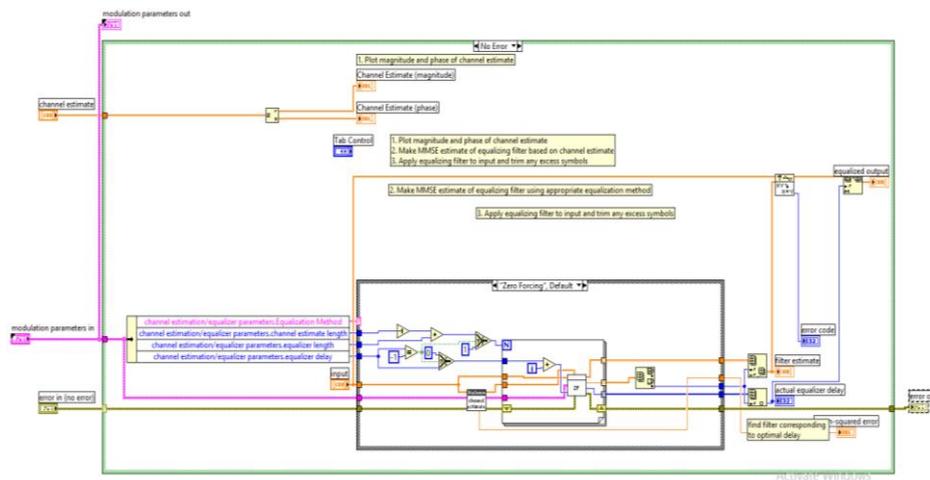
## ANEXO 6

## DIAGRAMA DE BLOQUE VI ALGORITMO DE MOOSE REFERENCIADO

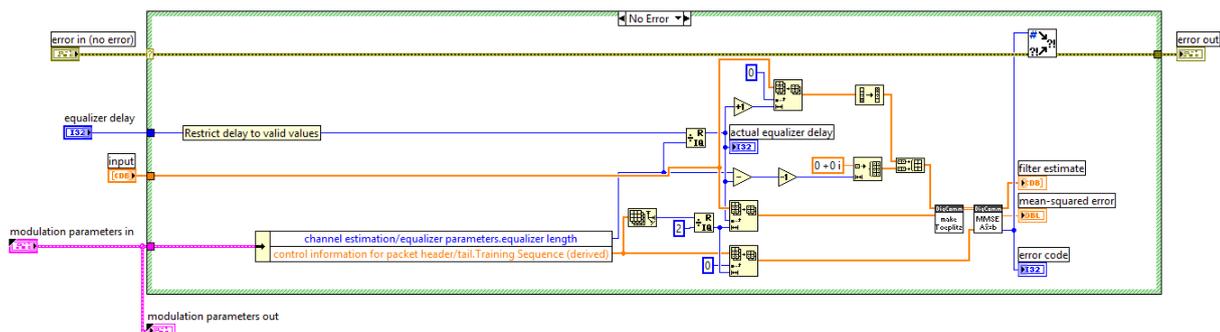


## ANEXO 7

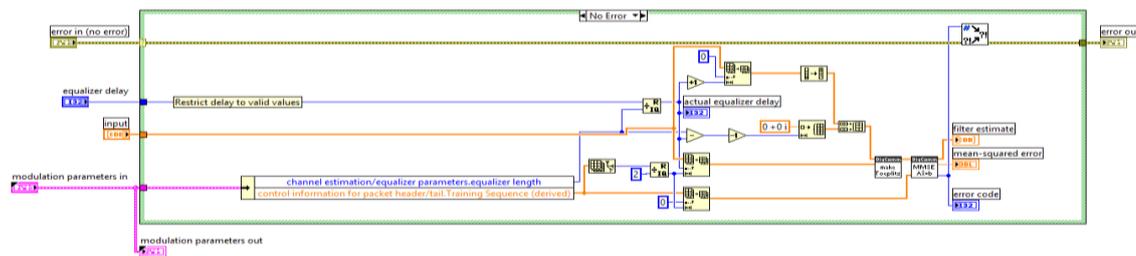
### DIAGRAMA DE BLOQUE VI ECUALIZADOR



### DIAGRAMA DE BLOQUE VI ECUALIZADOR DIRECTO



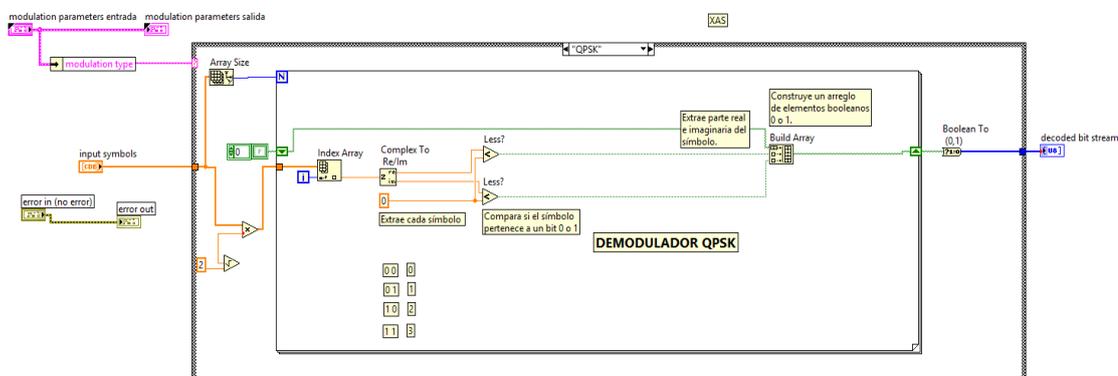
### DIAGRAMA DE BLOQUE VI ECUALIZADOR ZERO FORCING



## ANEXO 8

### DIAGRAMA DE BLOQUE VI DEMODULADOR

#### DEMODULACION Q-PSK



#### DEMODULACION 8-PSK

