



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS DE  
ECUALIZACIÓN LINEAL DE UN SISTEMA INALÁMBRICO DE  
UNA SOLA PORTADORA PARA LA TRANSMISIÓN DE  
IMÁGENES BAJO CANALES MULTITRAYECTORIA**

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

Previa a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

**Víctor Moisés Giler Ortiz**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al PhD. Boris Ramos, el equipo Administrativo de la MET por habernos brindado la ayuda necesaria para poder culminar el proceso de graduación con satisfacción y en general la maestría. A la Ing. Maricela Freire por su colaboración y guía en el desarrollo del proyecto.

## **DEDICATORIA**

A Dios.

A mis padres.

A mis hermanos.

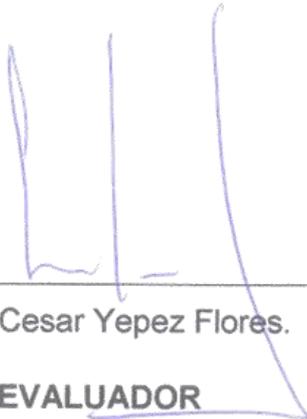
# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

M.Sc. Edison Del Rosario Camposano.

**EVALUADOR**



---

M.Sc. Cesar Yopez Flores.

**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.

*Victor Giler O.*

---

Victor Giler Ortiz

C.I.: 0930165238

## RESUMEN

El presente estudio corresponde a la implementación de un sistema inalámbrico para enviar imágenes en tiempo real usando las modulaciones QPSK y PI/4 QPSK enviadas a través de un medio que introduce ruido y distorsiones de la señal.

Bajo estas condiciones se realizará como principal objetivo de este estudio la comparación de dos métodos de ecualización lineal: el directo y el indirecto bajo un Sistema de Comunicación Inalámbrica sobre canales multitrayectoria. Para esto se realizarán pruebas variando los esquemas de modulación y las secuencias de entrenamiento para cada uno de los canales analizados.

A través del software de programación LABVIEW y los dispositivos USRP de National Instruments se realizaron los estudios de los diferentes escenarios expuestos anteriormente.

## CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACION</b> .....	III
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	V
<b>CONTENIDO</b> .....	VI
<b>ABREVIATURAS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IX
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	XII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. MARCO TEORICO</b> .....	2
<b>1.1. BER</b> .....	2
<b>1.2. SNR</b> .....	2
<b>1.3. CANAL INALAMBRICO</b> .....	2
<b>1.3.1. Modelo del Canal</b> .....	3
<b>1.4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES</b> .....	3
<b>1.5. MODULACION</b> .....	7
<b>1.5.1. QPSK</b> .....	7
<b>1.5.2. PI/4 QPSK</b> .....	8
<b>1.6. SECUENCIAS DE ENTRENAMIENTO</b> .....	8
<b>1.7. ECUALIZADORES</b> .....	9

<b>1.7.1. Ecuador de mínimos cuadrados Directo (MMSE) .....</b>	<b>9</b>
<b>1.7.2. Ecuador Indirecto .....</b>	<b>11</b>
<b>2. DESARROLLO DEL SISTEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>3. ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>38</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>40</b>

## ABREVIATURAS

<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>PSK</b>	Phase-Shift Keying
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>LLSE</b>	Least Linear Square Error
<b>MMSE</b>	Minimum Mean Square Error

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Propagación de la señal en un canal multitrayectoria. [1] .....	3
Figura 2. Diagrama del Proceso de Digitalización de una imagen. ....	4
Figura 3. Coeficientes DCT 8x8 [3].....	6
Figura 4. Diagrama de bloques del procesamiento de una imagen para transmitir.....	7
Figura 5. Diagrama de símbolos de la modulación QPSK.....	8
Figura 6. Diagrama de símbolos de la modulación PI/4 QPSK .....	8
Figura 7. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR A .....	14
Figura 8. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR B .....	14
Figura 9. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR A .....	15
Figura 10. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR B .....	15
Figura 11. Constelación QPSK sin Ecuilización sobre el canal INDOOR A .....	16
Figura 12. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuilización sobre el canal INDOOR A .....	16
Figura 13. Constelación QPSK sin Ecuilización sobre el canal INDOOR B .....	17
Figura 14. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuilización sobre el canal INDOOR B .....	17
Figura 15. Constelación QPSK sin Ecuilización sobre el canal OUTDOOR A .....	18
Figura 16. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuilización sobre el canal OUTDOOR A.....	18
Figura 17. Constelación QPSK sin Ecuilización sobre el canal OUTDOOR B .....	19
Figura 18. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuilización sobre el canal OUTDOOR B.....	19
Figura 19. Constelación QPSK con Ecuilización Directa sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	20

Figura 20. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	21
Figura 21. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 13.....	21
Figura 22. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	22
Figura 23. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	22
Figura 24. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13.....	23
Figura 25. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13.....	23
Figura 26. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 7 .....	24
Figura 27. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 7 .....	24
Figura 28. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 13 .....	25
Figura 29. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 13 .....	25
Figura 30. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	26
Figura 31. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7.....	27
Figura 32. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13.....	27
Figura 33. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13.....	28
Figura 34. SNR vs. BER del sistema para la modulación $\pi/4$ QPSK .....	29

Figura 35. SNR vs. BER del sistema para la modulación PI/4 QPSK, sincronización con el método de Moose y ecualización Directa. ....	29
Figura 36. SNR vs. BER del sistema para la modulación PI/4 QPSK .....	30
Figura 37. SNR vs. BER del sistema con una secuencia de entrenamiento Willard 13 y sincronización de trama Moose, Canal INDOOR A. ....	31
Figura 38. SNR vs. BER del sistema con modulación QPSK, secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal OUTDOOR B. ....	31
Figura 39. SNR vs. BER (Simulado y Real) del sistema con una secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal OUTDOOR B. ....	32
Figura 40. SNR vs. Rb del sistema con modulación QPSK, una secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal INDOOR A. ....	33
Figura 41. Imagen distorsionada por el efecto del ruido en el Canal INDOOR A. ....	33
Figura 42. Parámetros de Configuración en el Transmisor. ....	34
Figura 43. Constelación con corrección de trama utilizando algoritmo Moose. ....	35

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Códigos Barker [7] .....	9
Tabla 2. Códigos Willard [7] .....	9
Tabla 3. Parámetros de los Canales Indoor Comercial .....	14
Tabla 4. Parámetros de los Canales Outdoor en Zonas Rurales. ....	15

## INTRODUCCIÓN

Para poder enviar más información en el menor tiempo posible a través de sistemas de comunicaciones inalámbricos se tiene que aumentar la velocidad de transmisión y al mismo tiempo evitar las distorsiones que introduce en la señal el medio de propagación; dichas distorsiones pueden ser provocadas factores externos como la pérdida por trayectorias, reflexión, absorción, difracción de la señal hasta llegar al receptor.

Los ecualizadores son diseñados para minimizar estas distorsiones producidas por el canal a través del uso de filtros que ayudan a compensar dichos efectos ya que en el caso de los datos digitales es muy importante que se recupere la información para que la misma sea válida, como el caso de las imágenes donde la pérdida de una parte de la señal puede hacer que la misma se vea distorsionada o incluso no pueda ser observada.

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1. BER

El BER (*en inglés* Ratio Error Rate) es el término usado el cual se refiere a la cantidad de bits recibidos de manera errónea respecto a un total de bits recibidos en un rango de tiempo determinado, el cual es utilizado para evaluar la eficiencia de un sistema de telecomunicaciones para transportar datos de un lugar a otro.

## 1.2. SNR

EL SNR (*en inglés* Signal Noise Ratio) está definido con la relación existente entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la afecta. Debido a que esta relación generalmente ser muy pequeña se la suele expresar en decibelios (dB).

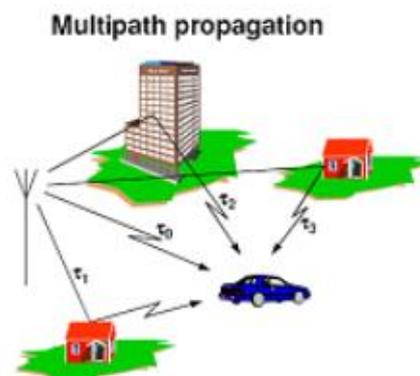
$$SNR|_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_r}, \quad (1)$$

Siendo que  $P_s$  es la potencia de la Señal y  $P_r$  la potencia del ruido.

## 1.3. CANAL INALAMBRICO

Es el medio físico por el cual se propaga la señal transmitida usando señales electromagnéticas entre el transmisor y el receptor, el cual posee distintas propiedades que afectan a la comunicación alterando la señal enviada. Para poder analizar el comportamiento de un canal de comunicación se han diseñado varios modelos que sintetizan sus efectos.

### 1.3.1. Modelo del Canal.



**Figura 1. Propagación de la señal en un canal multitrayectoria. [1]**

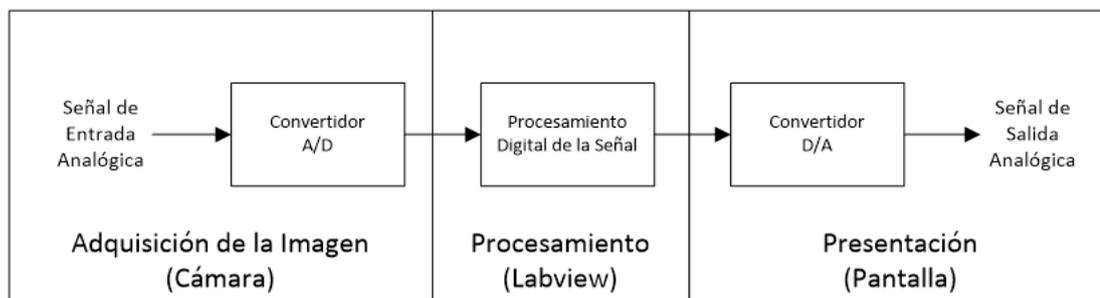
El modelo de canal utilizado en este análisis es el modelo de canal ISI (Interferencia Inter Simbólica) con desvanecimiento multitrayectoria, el cual es un modelo que se usa generalmente para comunicaciones móviles cuando existen desvanecimientos durante la transmisión debido a la presencia de varios objetos en el entorno por el cual la señal es transmitida provocando que esta se disperse y lleguen varias versiones de la misma debido a la múltiples réplicas que se crearon de la señal al propagarse. [2]

$$h(t) = \sum_{p=1}^N a_p e^{j\phi_p} \delta(t - \tau_p). \quad (2)$$

## 1.4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES

Se puede decir que la imagen es la representación bidimensional de un objeto compuesta por múltiples puntos correspondiente a los diferentes rayos de luz provenientes de ciertas fuentes luego de interactuar con la estructura óptica.

Para el procesamiento digital de la imagen se pueden distinguir tres etapas principales como se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2. Diagrama del Proceso de Digitalización de una imagen.**

De la adquisición se encarga un transductor o conjunto de transductores los cuales a través del uso de la luz percibida crean una representación del objeto observado en una imagen. Por ejemplo: el ojo, una cámara fotográfica o un tomógrafo.

El procesamiento consiste en la eliminación del ruido y la utilización de diferentes métodos para obtener las mejores características utilizando diferentes herramientas matemáticas las cuales nos permiten filtrar, comprimir (con y sin pérdida de calidad) o manipular la imagen dependiendo del uso que se le dará a la misma; dichas características dependen del uso que se le dará a la imagen puesto que si es solo para mostrar una fotográfica lo importante es mantener la relación de la luminancia y los colores de la misma, en cambio si se la usara para obtener datos y realizar otros estudios a partir de ellos lo cual requerirá descomponerla o modificarla.

La presentación es el proceso que se realiza para mostrar la imagen procesada a través de diferentes medios como el impreso o a través de una pantalla.

Para la transmisión de la imagen a través de un medio como el inalámbrico es necesario comprimir la imagen y convertirla en un flujo de bits debido a que los sistemas inalámbricos tienen un ancho de banda limitado y la imagen al ser una representación bidimensional de un objeto sin compresión consume gran cantidad del ancho de banda.

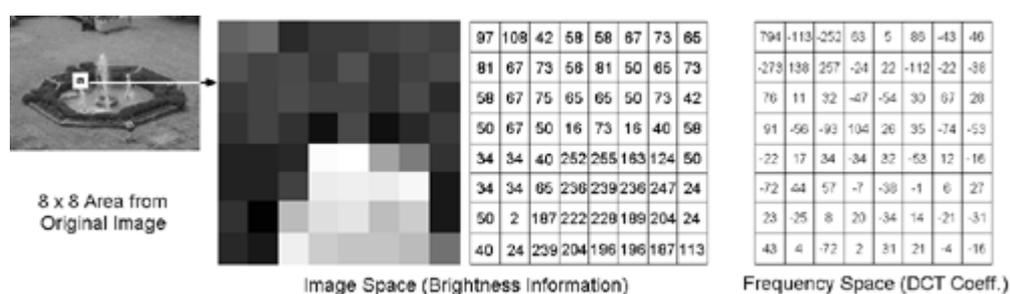
Para la compresión existen varios métodos que pueden ser con o sin pérdida de información donde la codificación JPEG (Joint Photographic Experts Group) es una de las más conocidas y usadas. Esta codificación está basada en el uso de DCT (Discrete Cosine Transform), el cual es un método que consiste en transformar la imagen al dominio de la frecuencia agrupando los píxeles de la imagen en bloques de 8x8 (Ecuación 3-4) para luego escoger los valores que contienen la mayor información de la imagen que son los que están ubicados en la esquina superior derecha y haciendo cero el resto de valores, los cuales luego serán reducidos a través de una tabla de cuantización. [3]

$$y_{kl} = \frac{c(k)c(l)}{4} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 x_{ij} \cos\left(\frac{(2i+1)k\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)l\pi}{16}\right), \quad (3)$$

$$\text{con } k, l = 0, 1, \dots, 7$$

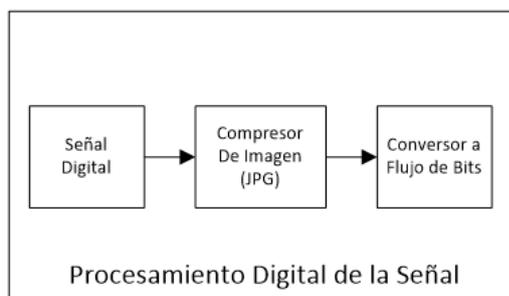
$$c(k) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & k = 0 \\ 1, & k \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Por ejemplo en la Figura 3, podemos observar un bloque de 8x8 de una imagen con su representación espacial con valores de luminosidad y el mismo bloque en el dominio de la frecuencia (coeficientes DCT).



**Figura 3. Coeficientes DCT 8x8 [3]**

Para la captura y procesamiento de la imagen en LabView se utilizó los módulos adicionales *Vision Acquisition Software* [4] y *Vision Development* [5], los cuales permiten crear un objeto para instanciar la imagen obtenida desde la cámara o desde un archivo y alojarlo en la memoria del computador, además tiene herramientas que nos ayudan a procesar la imagen para poder comprimirla, en este caso se usó compresión JPEG, o también para descomponerla y modificar su tamaño o calidad.



**Figura 4. Diagrama de bloques del procesamiento de una imagen para transmitir.**

## 1.5. MODULACION

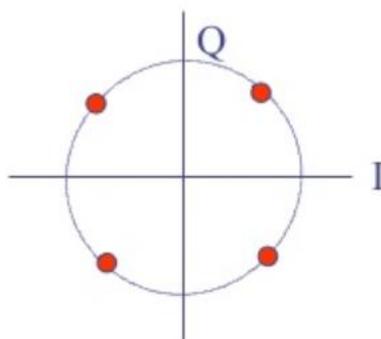
La modulación es el proceso por el cual se modifica las propiedades de periodicidad de una señal insertándola en otra señal generalmente llamada *portadora*.

Existen diferentes métodos de modulación pero los que se analizaran en este documento serán QPSK y PI/4 QPSK, los cuales son métodos de modulación en cuadratura la cual convierte la señal original en dos señales de la misma frecuencia pero a 90° de diferencia de fase.

### 1.5.1. QPSK

QPSK (*en inglés* Quadrature Phase Shift Keying) es el método por el cual se envían dos bits por cada símbolo (Figura 5), determinado por la fórmula:

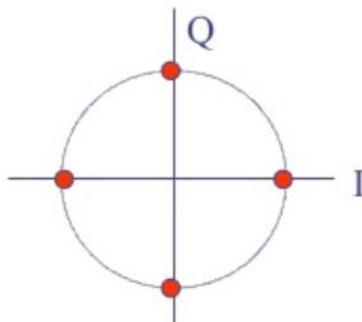
$$V_{QPSK}(t) = I \cos w_c t + Q \sin w_c t \quad (5)$$



**Figura 5. Diagrama de símbolos de la modulación QPSK**

### 1.5.2. PI/4 QPSK

Este método de modulación es parecido a la modulación QPSK pero rotado  $45^\circ$ . Su respectiva grafica seria la siguiente:



**Figura 6. Diagrama de símbolos de la modulación PI/4 QPSK**

### 1.6. SECUENCIAS DE ENTRENAMIENTO

Las secuencias de entrenamiento son un conjunto de bits conocidos que poseen altas propiedades de correlación cruzada y auto correlación las cuales son de gran utilidad para poder realizar diferentes métodos de verificación

dentro de una trama más grande de bits, tales como la sincronización de trama y la estimación de un canal para la ecualización. [6]

Las secuencias de entrenamiento con sus diferentes variaciones de longitud que se utilizarán en este proyecto son las siguientes:

Longitud	Valores
7	[0001101]
11	[00011101101]
13	[0000011001010]

**Tabla 1. Códigos Barker [7]**

Longitud	Valores
7	[1110100]
11	[11101101000]
13	[1111100101000]

**Tabla 2. Códigos Willard [7]**

En este análisis para el sistema se utilizaron 3 secuencias de Barker y 3 secuencias de Willard (Tabla 1-2).

## 1.7. ECUALIZADORES

El ecualizador o filtro, es el proceso que se realiza para mitigar los efectos del canal corrigiendo las distorsiones introducidas al pasar por este. En este análisis se los compara los métodos de ecualización Lineal Directo e Indirecto.

### 1.7.1. Ecualizador de mínimos cuadrados Directo (MMSE)

Este método de ecualización utiliza directamente la secuencia de entrenamiento recibida y el tamaño definido por el usuario del ecualizador para estimar el mejor filtro que debe ser usado en este sistema mediante el mínimo error cuadrático medio. [8]

Luego de pasar la ecualización lineal la cual se considera que esta señal tendrá un retardo  $n_d$  la cual tendría estaría representada por la siguiente ecuación:

$$\hat{s}[n - n_d] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{nd}[l]y[n - l] \quad (6)$$

Luego utilizando la secuencia de entrenamiento  $s[n] = t[n]$  tal que  $n = 0, 1, \dots, N_T$ . Esta secuencia es de valor conocido tanto en el emisor como en el receptor. Al ingresar la secuencia dentro de la señal tendríamos:

$\hat{s}[n - n_d] = t[n - n_d]$  , para  $n = n_d, n_d + 1, \dots, n_d + N_t$ . Y, rearmando la expresión anterior (6) junto con la expresión de la secuencia se obtiene:

$$t[n] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{nd}[l]y[n + n_d - l] \quad (7)$$

Para  $n = 0, 1, \dots, N_t$ .

Expresando la ecuación (7) como una ecuación lineal se obtiene:

$$\begin{bmatrix} t[0] \\ \vdots \\ t[N_t - 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[n_d] & \cdots & y[n_d - L_f] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y[n_d + N_t - 1] & \cdots & s[n_d + N_t - L_f] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{nd}[0] \\ \vdots \\ f_{nd}[L_f] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Debido a que la señal llega con la afectación del ruido es razonable asumir que la señal llegará con ruido se puede decir que  $Y$  sería una matriz de rango completo, cuya solución de mínimos cuadrados es:

$$\hat{f}_{nd} = (Y_{nd}^* Y_{nd})^{-1} Y_{nd}^* t \quad (9)$$

Dado que el error cuadrático medio es:

$$J[n_d] = \|t - \hat{Y}_{n_d} \hat{f}_{n_d}\|^2 \quad (10)$$

El mínimo puede ser encontrado escogiendo un  $n_d$  donde  $J[n_d]$  sea mínimo. Es necesario que  $Y$  sea  $N \geq M$  lo cual se cumple cuando  $L_f \leq N_t - 1$ , lo cual significa que la longitud del ecualizador será determinada por la longitud de la secuencia de entrenamiento.

Al calcular el ecualizador directamente sin necesidad de estimar el canal, el método directo evita propagar el error en la estimación del canal, siendo que mientras mayor sea la secuencia de entrenamiento más efectivo es el ecualizador.

### 1.7.2. Ecualizador Indirecto

La ecualización indirecta se constituye de dos procesos a través de los cuales se calculará la estimación y la ecualización del canal. [6]

**La estimación del canal:** Para la estimación del canal existen varios métodos tales como el criterio de máxima verosimilitud, MMSE (Error cuadrático medio mínimo) y LLSE (Mínimo error cuadrático lineal).

En este caso se usó el método LLSE.

Dado que la secuencia de entrenamiento insertada en la señal es conocida, se considera

$$y[n] = \sum_{l=0}^L h[l]s[n-l] + v[n] \quad (11)$$

Donde  $s[n]$  es la secuencia de entrenamiento de longitud  $N_t$ ,  $h[l]$  el canal a estimar. Tomando en cuenta que la idea de aplicar LLSE es encontrar los coeficientes del canal que minimice el error cuadrático.

$$\hat{h}[0], \hat{h}[1], \dots, \hat{h}[L] = \underset{a[0], a[1], \dots, a[L]}{\operatorname{arg}} \sum_{n=L}^{N_t-1} \|y[n] - \sum_{l=0}^L a[l]t[n-l]\|^2 \quad (12)$$

Aproximando la ecuación (11) a un conjunto de ecuaciones lineales:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y[L] \\ y[L+1] \\ \vdots \\ y[N_t-1] \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} t[L] & \cdots & t[0] \\ t[L+1] & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t[N_t-1] & \cdots & t[N_t-1-L] \end{bmatrix}}_T \underbrace{\begin{bmatrix} a[0] \\ a[1] \\ \vdots \\ a[L] \end{bmatrix}}_A \quad (13)$$

Donde  $T$  es la matriz de la secuencia de entrenamiento y  $A$  serían los coeficientes del canal estimado.

**Ecuador del canal:** Una vez que se obtuvo el canal estimado, lo siguiente es eliminar los efectos del canal. Para este paso consideramos la ecualización lineal, el objetivo es encontrar un filtro tal que

$$\sum_{l=0}^{L_f} f[l]\hat{h}[n-l] \approx \delta[n-n_d] \quad (14)$$

Aproximando la ecuación (14) a un conjunto de ecuaciones lineales tal que minimice el error cuadrático. La matriz sería:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{h}[0] & 0 & \dots & \dots \\ \hat{h}[1] & \hat{h}[0] & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & & \\ \hat{h}[L] & & & \\ 0 & \hat{h}[L] & \dots & \\ \vdots & & & \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{H}}} \underbrace{\begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ \vdots \\ \vdots \\ f[L_f] \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{e}_{n_d}} \leftarrow n_d + 1 \quad (15)$$

La matriz H de tipo Toeplitz. Asumiendo que H es de rango completo, lo cual es así si ningún coeficiente del canal estimado es cero. Entonces la solución de los mínimos cuadrados lineales será:

$$\hat{f}_{n_d} = (\hat{\mathbf{H}} * \hat{\mathbf{H}})^{-1} \hat{\mathbf{H}} * \mathbf{e}_{n_d} \quad (16)$$

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA

El sistema de comunicación inalámbrica se lo desarrollo basado en la práctica 4 del manual de laboratorio [6] de los equipos USRP sobre ecualización y estimación de canal [10]. En el cual se desarrollaron los VI's correspondientes a los Ecualizadores Directo e Indirecto, los sincronizadores de trama del algoritmo de Moose Y Sliding Correlator, las modulaciones QPSK y PI/4 QPSK y el procesamiento de la imagen capturada a través de la cámara de la computadora o de un archivo dentro del disco duro.

Para testear el comportamiento del sistema bajo el efecto del ruido, se hicieron pruebas aumentando el ruido de los canales ISI y a través de los resultados obtenidos se realizaron graficas comparativas de los diferentes esquemas tal

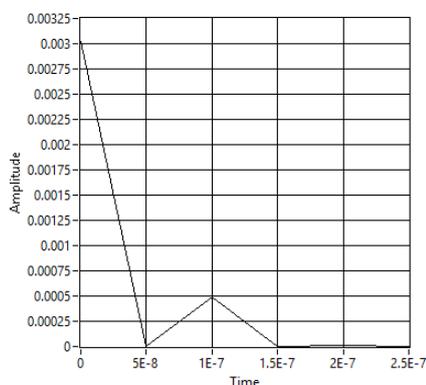
que podamos verificar cual modulación es más efectiva, y comprobar la teoría variando las secuencias de entrenamiento y su longitud.

El diagrama de bloques de los VI's desarrollados se encuentra en los ANEXOS.

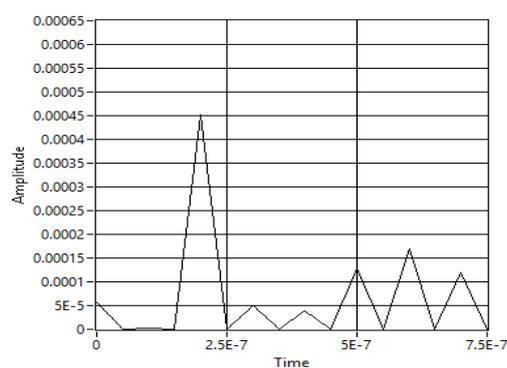
Los canales ISI multitrayectoria usados fueron modelados usando los siguientes parámetros:

CANALES INDOOR			
A		B	
Retraso (nSeg)	Potencia (dB)	Retraso (nSeg)	Potencia (dB)
0	0	0	0
100	-5.9	100.00	-0.2
200	-14.6	200.00	-5.4
		400.00	-6.9
		500.00	-24.5
		700.00	-29.7

**Tabla 3. Parámetros de los Canales Indoor Comercial**



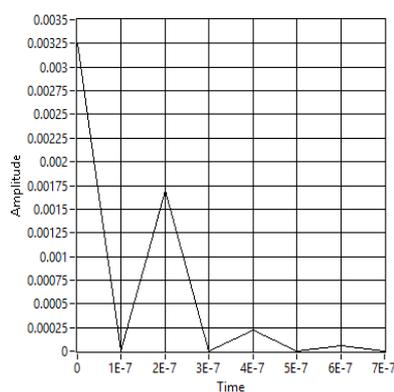
**Figura 7. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR A**



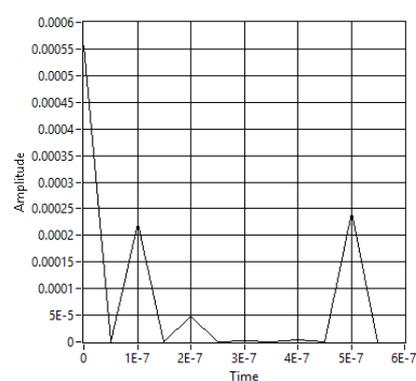
**Figura 8. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR B**

CANALES OUTDOOR			
A		A	
Retraso (nSeg)	Retraso (nSeg)	Retraso (nSeg)	Retraso (nSeg)
0	0	0	0
200	-2	100	-4
400	-10	200	-8
600	-20	300	-12
		400	-16
		500	-20

**Tabla 4. Parámetros de los Canales Outdoor en Zonas Rurales.**



**Figura 9. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR A**



**Figura 10. Perfil de Potencia de los retrasos del canal INDOOR B**

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS

Al realizar las pruebas podemos observar a través de las siguientes Figuras la afectación de cada canal sin ecualizar para la modulación QPSK que es parecido la afectación en PI/4 QPSK:

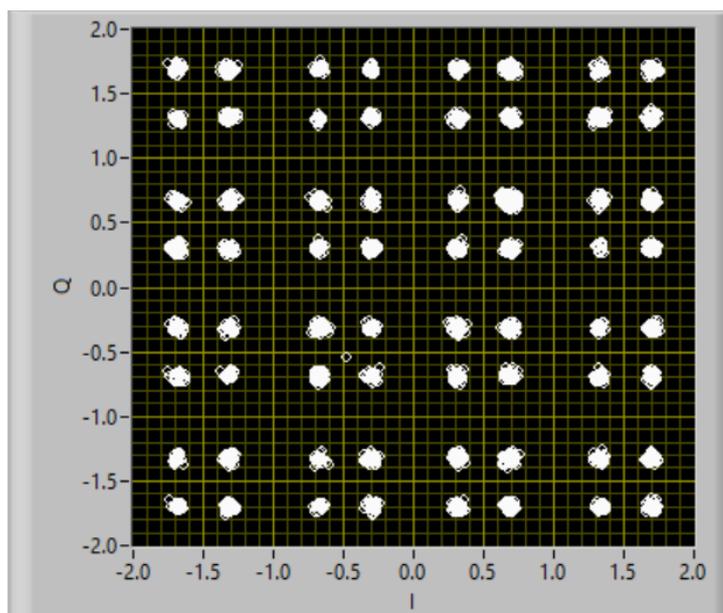


Figura 11. Constelación QPSK sin Ecuación sobre el canal INDOOR  
A

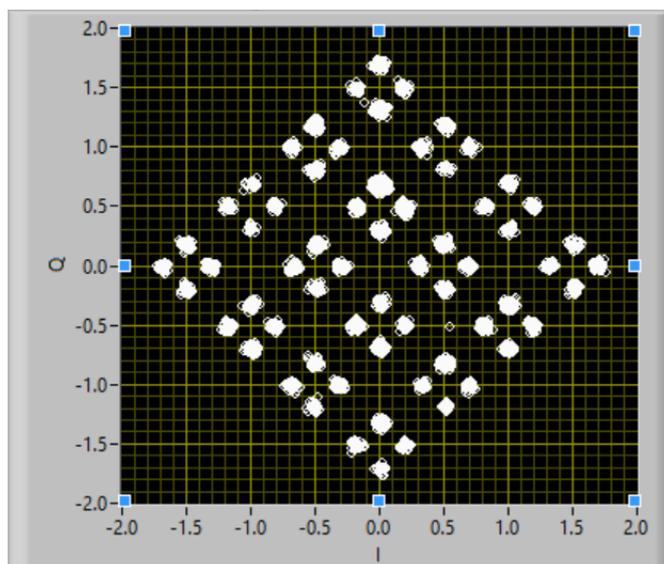
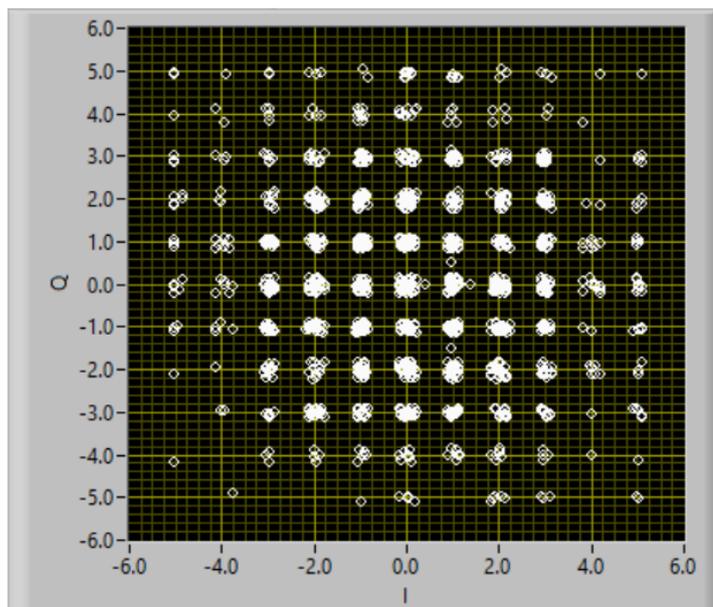
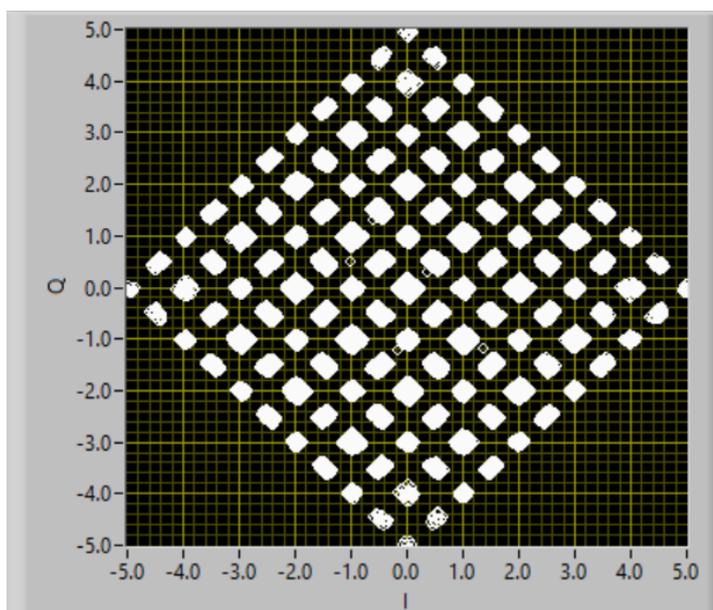


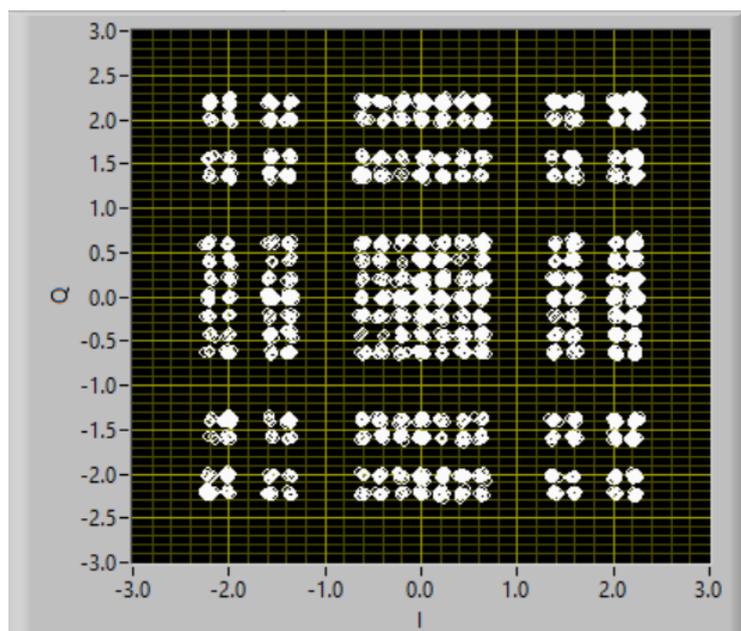
Figura 12. Constelación  $\pi/4$  QPSK sin Ecuación sobre el canal  
INDOOR A



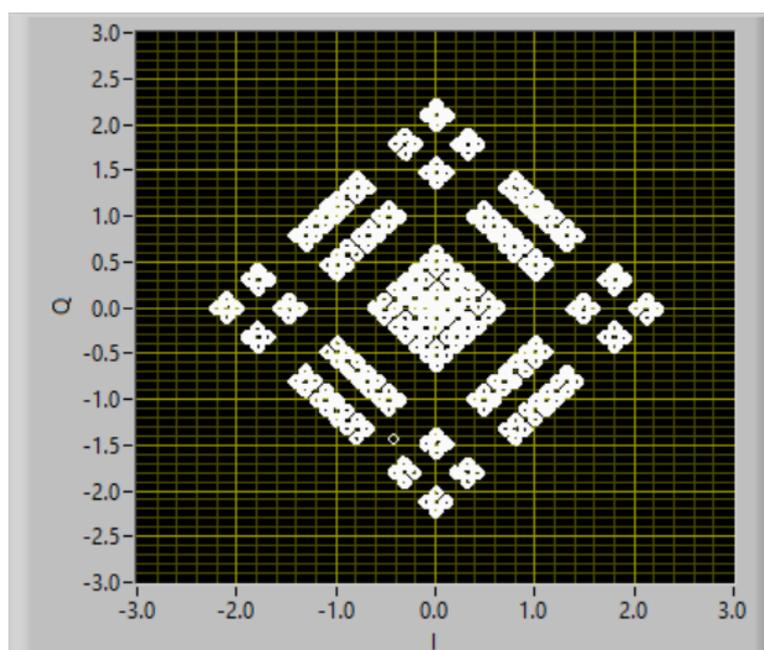
**Figura 13. Constelación QPSK sin Ecuación sobre el canal INDOOR B**



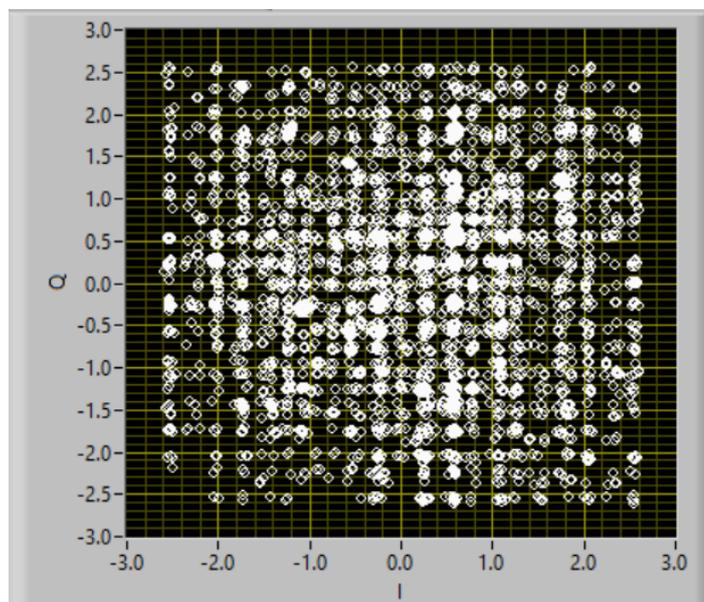
**Figura 14. Constelación  $\pi/4$  QPSK sin Ecuación sobre el canal INDOOR B**



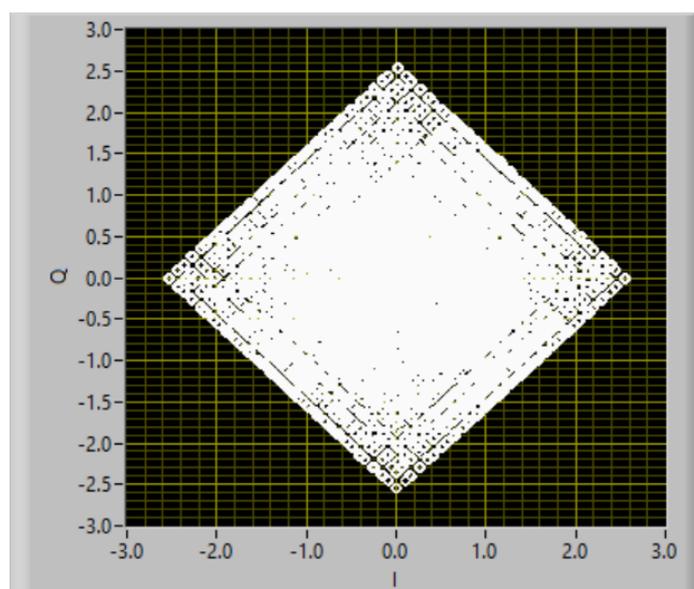
**Figura 15. Constelación QPSK sin Ecuación sobre el canal OUTDOOR A**



**Figura 16. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuación sobre el canal OUTDOOR A**



**Figura 17. Constelación QPSK sin Ecuación sobre el canal OUTDOOR B**



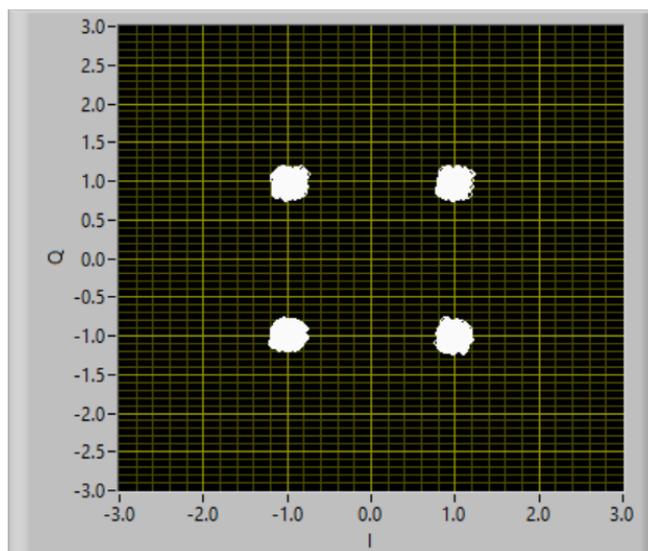
**Figura 18. Constelación PI/4 QPSK sin Ecuación sobre el canal OUTDOOR B**

La interferencia intersimbólica presente en los datos recibidos se soluciona en la mayoría de los casos al aplicar la ecualización, sea ésta a través del método directo o del indirecto como se puede observar en las siguientes gráficas donde se compara los resultados entre ambos métodos de ecualización con varias combinaciones entre secuencias de entrenamiento variando su longitud y configurando los mismos valores de 'longitud del canal estimado' y de 'longitud del ecualizador' para ambos métodos:

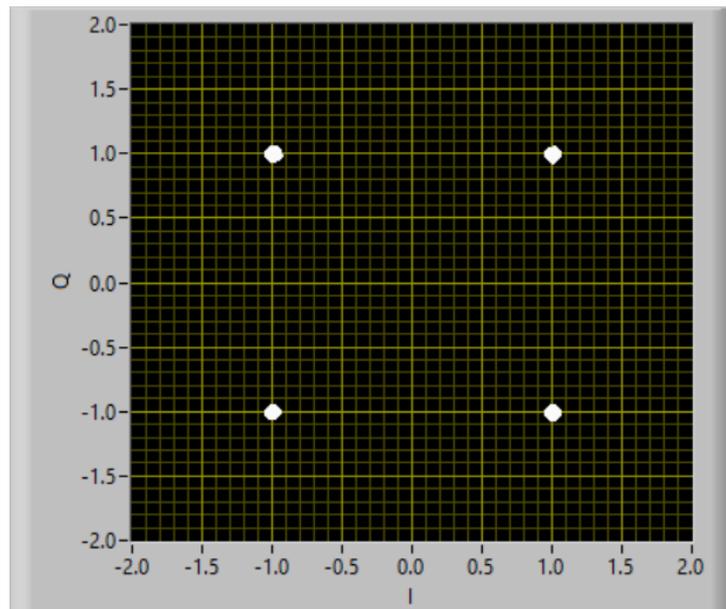
### PRUEBAS SOBRE EL CANAL INDOOR A:

Ya que este canal tiene 3 pasos, se configuró:

Longitud del canal estimado	3
Longitud del ecualizador	6

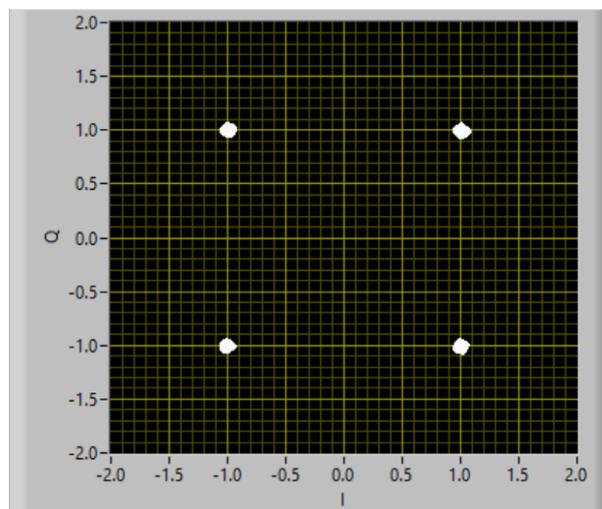


**Figura 19. Constelación QPSK con Ecualización Directa sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 7**



**Figura 20. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 7**

Variando la longitud de la secuencia de entrenamiento a Barker 13 el método Directo tuvo una mejora evidente, mientras que el método indirecto permaneció igual.

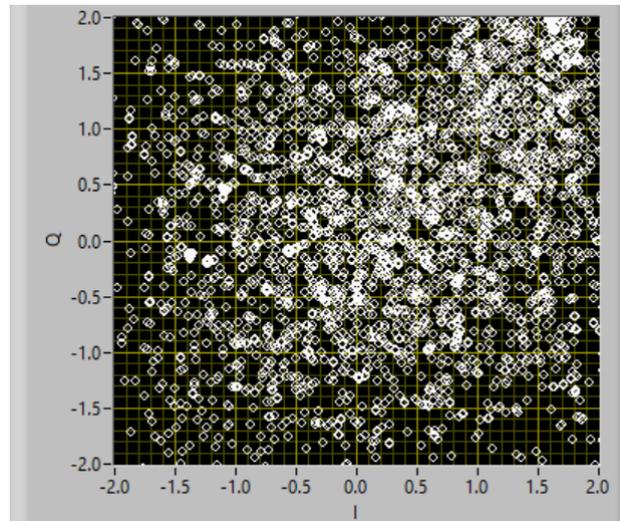


**Figura 21. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR A con secuencia de entrenamiento Barker 13**

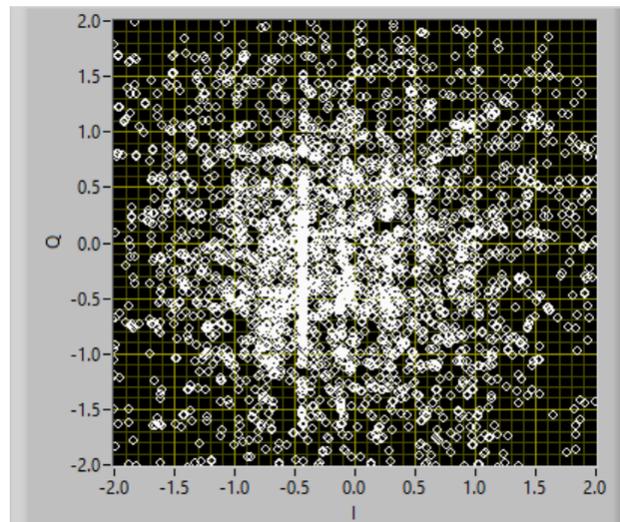
## PRUEBAS SOBRE EL CANAL INDOOR B:

Ya que este canal tiene 8 pasos, se configuró:

Longitud del canal estimado	8
Longitud del ecualizador	11

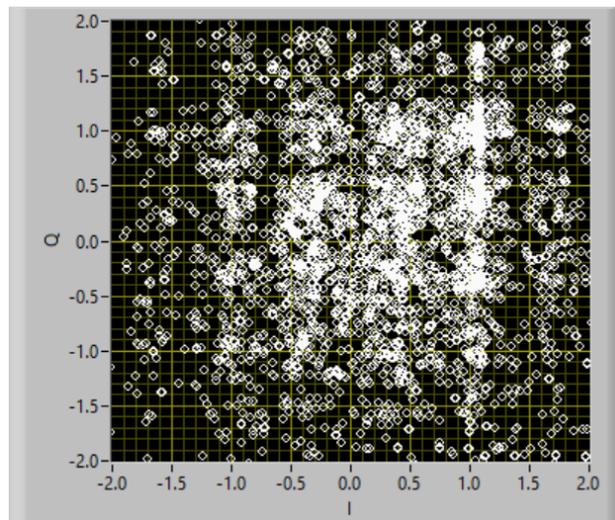


**Figura 22. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7**

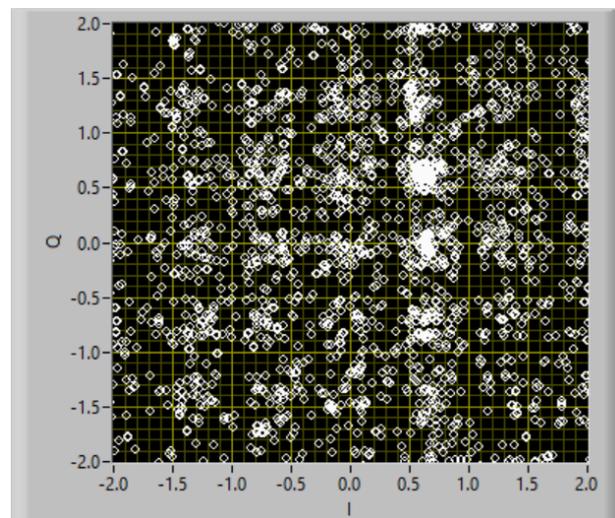


**Figura 23. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7**

Variando la longitud de la secuencia de entrenamiento a Barker 13 ambos tuvieron una mejora evidente aunque ninguno pudo arreglar claramente la constelación debido al ruido y la interferencia intersimbólica que este canal introduce en la señal.



**Figura 24. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13**

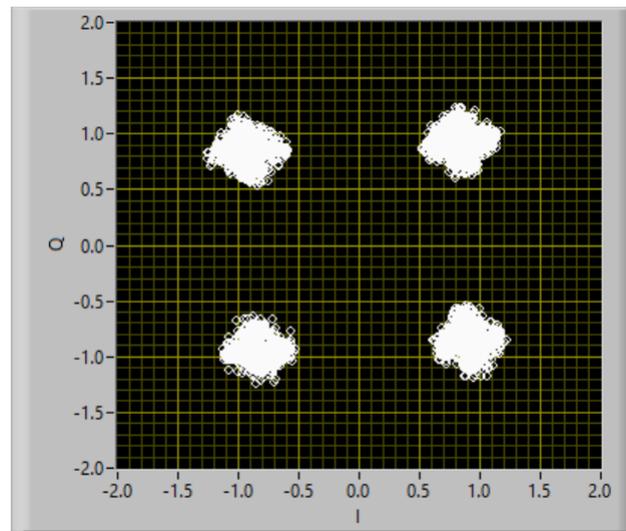


**Figura 25. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13**

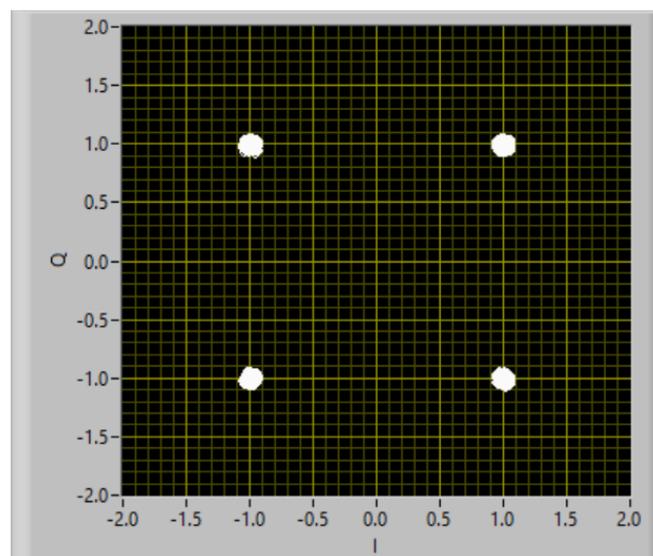
## PRUEBAS SOBRE EL CANAL OUTDOOR A:

Ya que este canal tiene 4 pasos, se configuró:

Longitud del canal estimado	4
Longitud del ecualizador	6

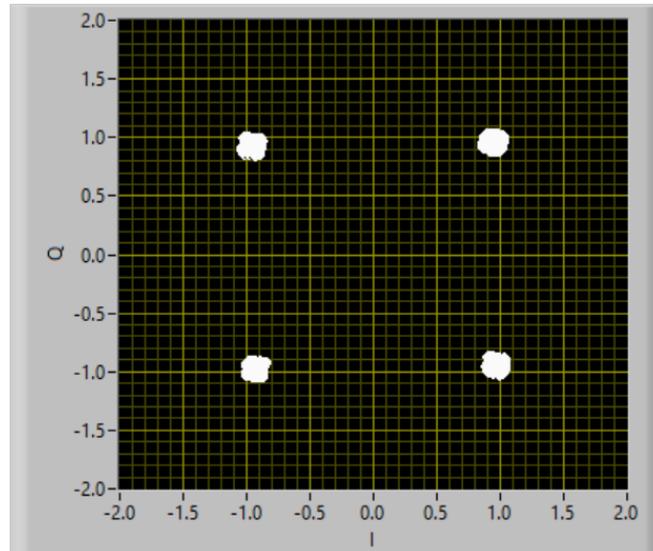


**Figura 26. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 7**

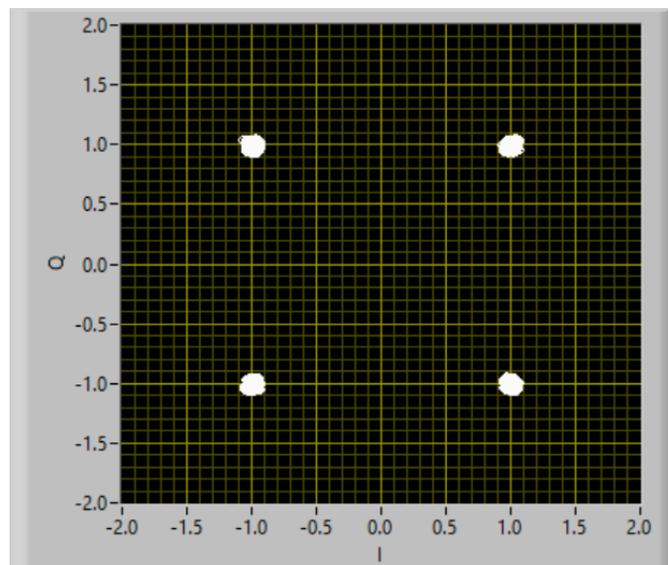


**Figura 27. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 7**

Variando la longitud de la secuencia de entrenamiento a Willard 13, el método indirecto tuvo una mejora evidente, mientras que el método indirecto permaneció igual.



**Figura 28. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 13**

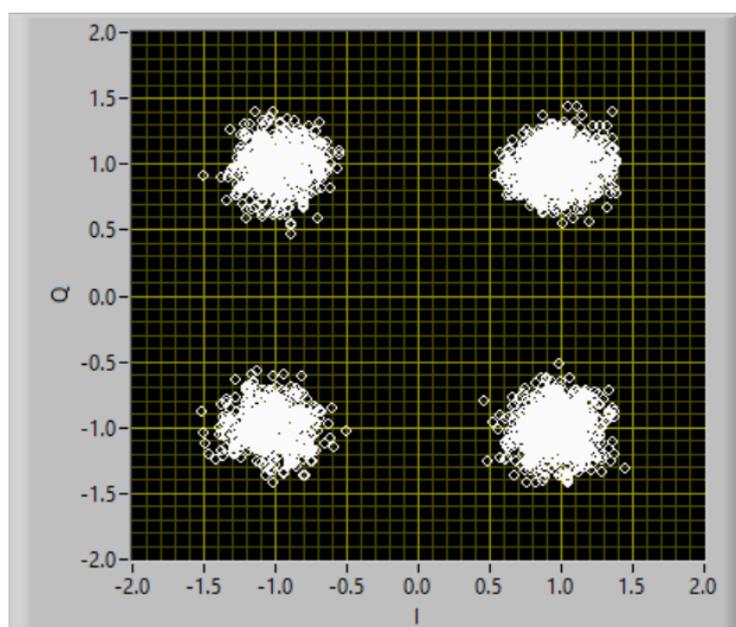


**Figura 29. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR A con secuencia de entrenamiento Willard 13**

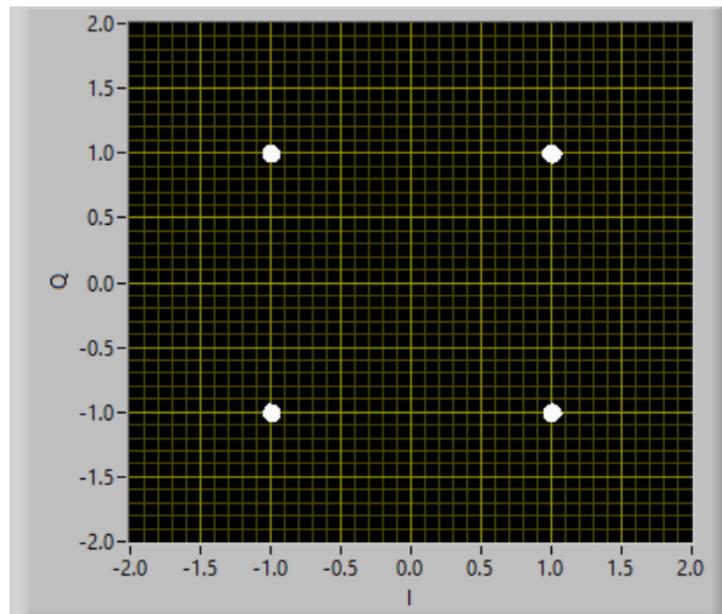
## PRUEBAS SOBRE EL CANAL OUTDOOR B:

Ya que este canal tiene 6 pasos, se configuró:

Longitud del canal estimado	6
Longitud del ecualizador	9

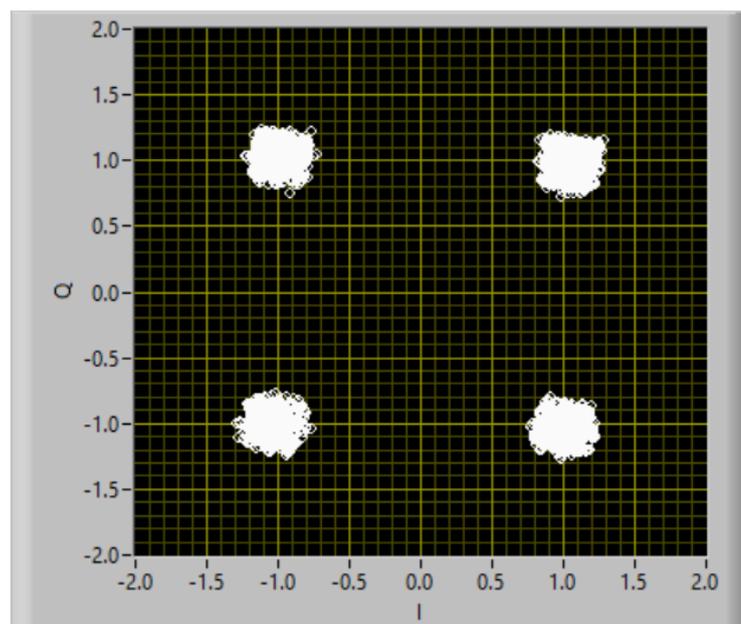


**Figura 30. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7**

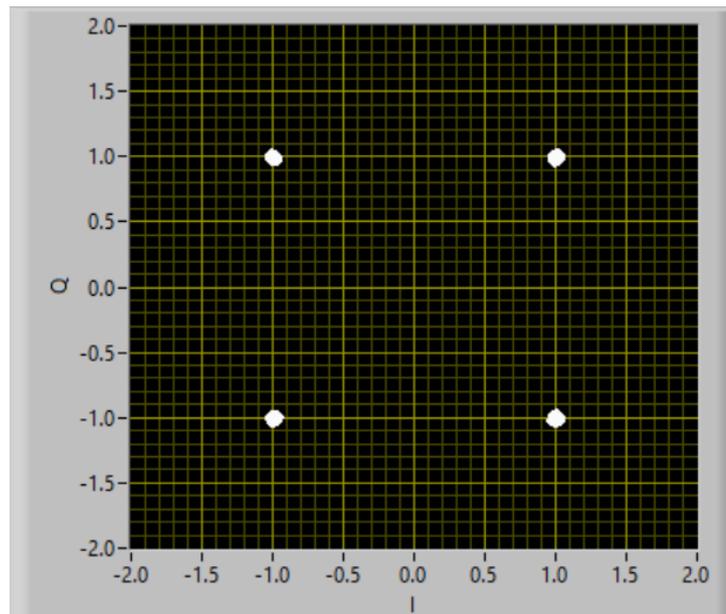


**Figura 31. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 7**

Variando la longitud de la secuencia de entrenamiento a Barker 13.

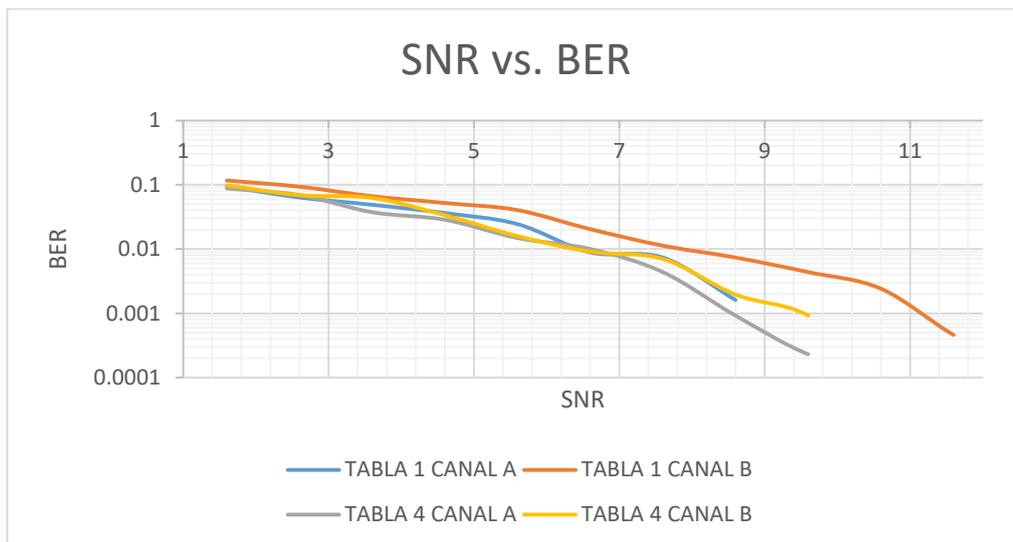


**Figura 32. Constelación QPSK con Ecuación Directa sobre el canal INDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13**



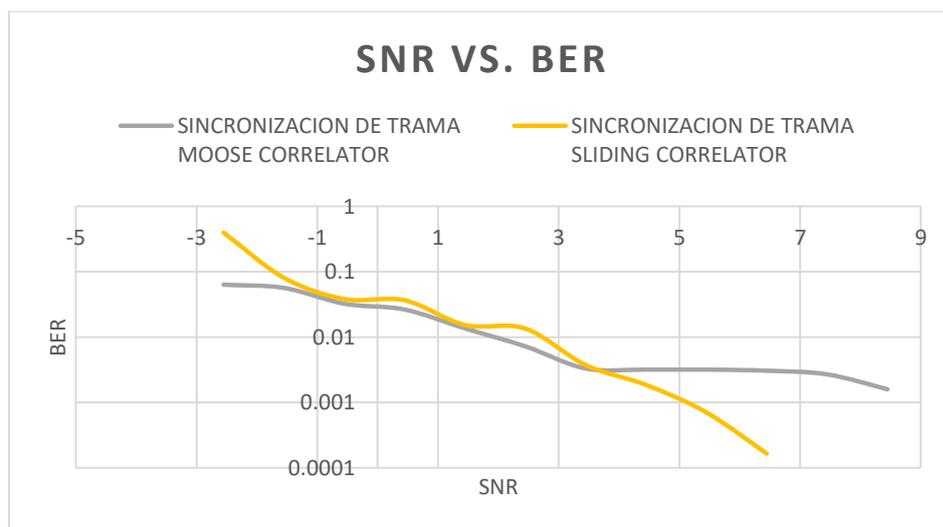
**Figura 33. Constelación QPSK con Ecuación Indirecta sobre el canal OUTDOOR B con secuencia de entrenamiento Barker 13**

En la Figura 34 se muestra el efecto de los canales multitrayectoria. Siendo el canal Indoor Comercial B (Tabla 3-B) el que produce una mayor afectación a la señal, lo cual concuerda con la teoría debido a que este canal es el que tiene la mayor cantidad de multitrayectorias.



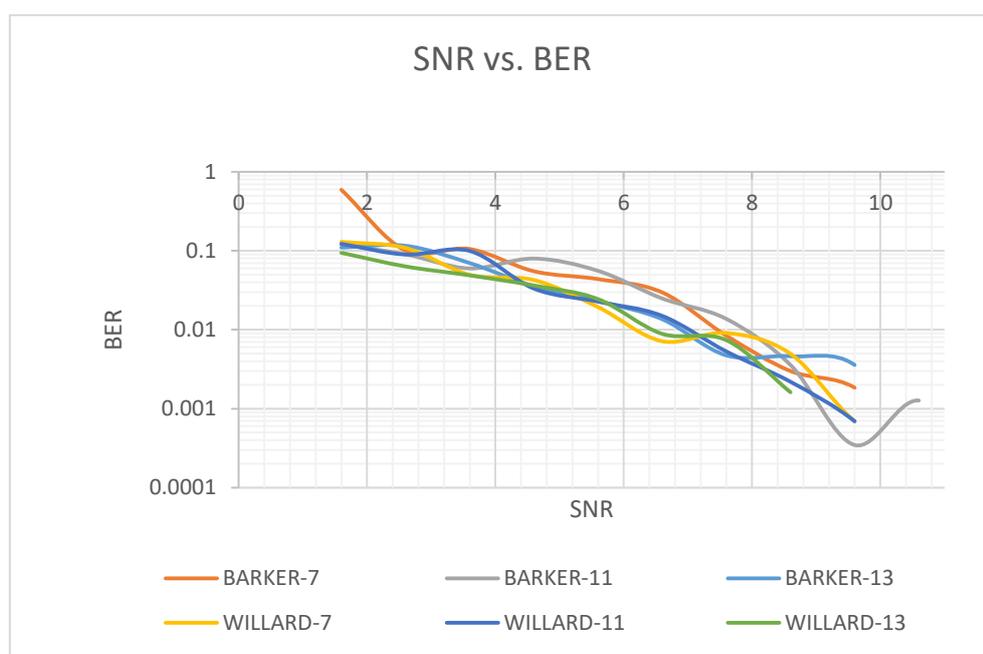
**Figura 34. SNR vs. BER del sistema para la modulación PI/4 QPSK**

En la Figura 35 se puede observar que el método de sincronización de trama Moose es mejor que el método Sliding pero tiende a falla cuando el ruido aumenta en el sistema, mientras que el método Sliding se mantiene estable.



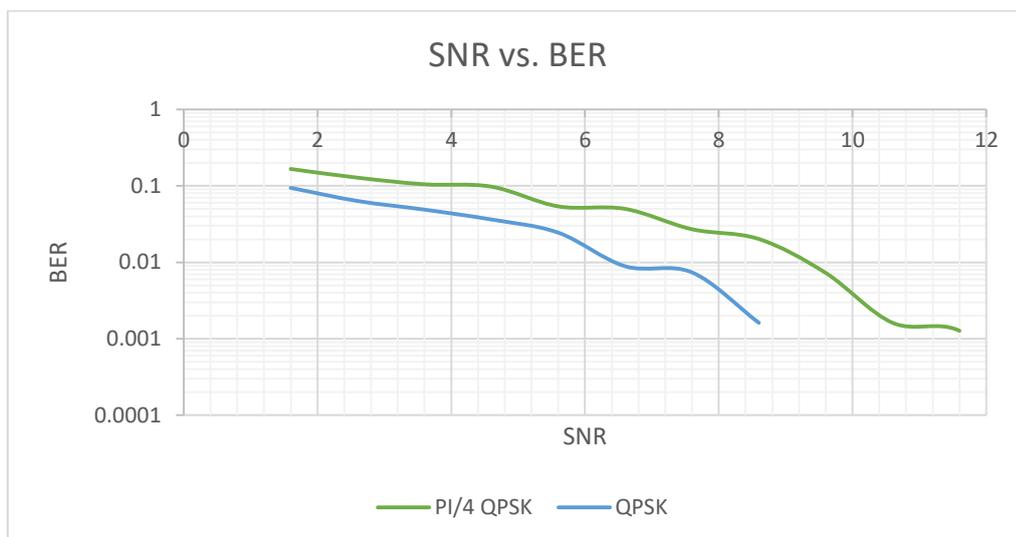
**Figura 35. SNR vs. BER del sistema para la modulación PI/4 QPSK, sincronización con el método de Moose y ecualización Directa.**

En la siguiente grafica (Figura 36) se puede observar la efectividad de las diferentes secuencias de entrenamiento. Donde se puede concluir que mientras mayor es el tamaño de la secuencia mejor es el rendimiento, siendo la secuencia de Willard 13 la mejor, lo cual comprueba la base teórica que indica que mientras mayor sea la secuencia de entrenamiento el ecualizador será más eficiente minimizando la interferencia producida por el canal.



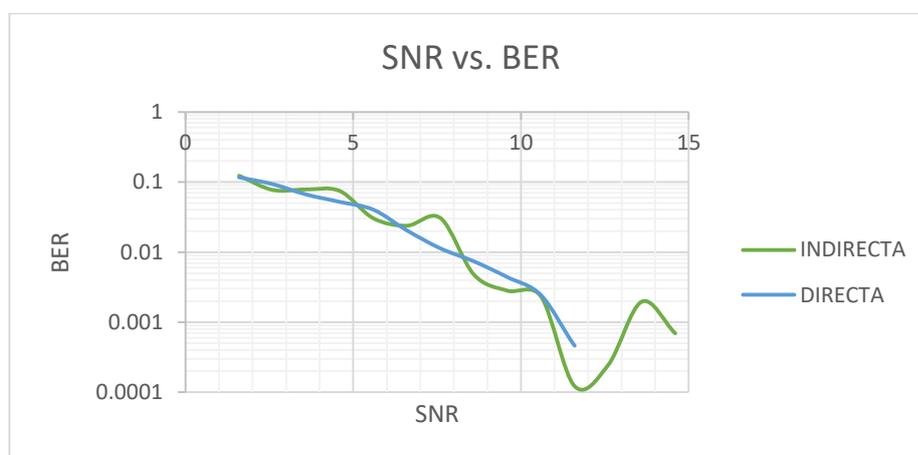
**Figura 36. SNR vs. BER del sistema para la modulación PI/4 QPSK**

También se realizó una comparación entre las modulaciones QPSK y PI/4 QPSK donde se obtuvo que la modulación QPSK tiene una mejor recuperación en el receptor (Figura 37).



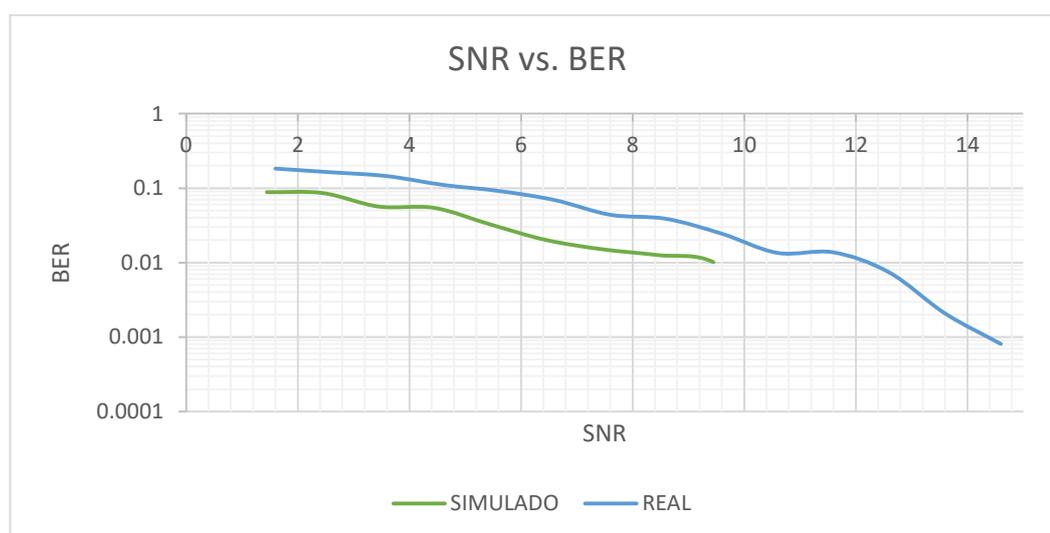
**Figura 37. SNR vs. BER del sistema con una secuencia de entrenamiento Willard 13 y sincronización de trama Moose, Canal INDOOR A.**

También se realizó una comparación entre los diferentes métodos de ecualización (Figura 38), lo cual nos dio como resultado que la ecualización indirecta y la directa tienen un resultado muy parecido de BER, pero a valores menores de BER se obtuvo un mejor resultado con la ecualización indirecta.



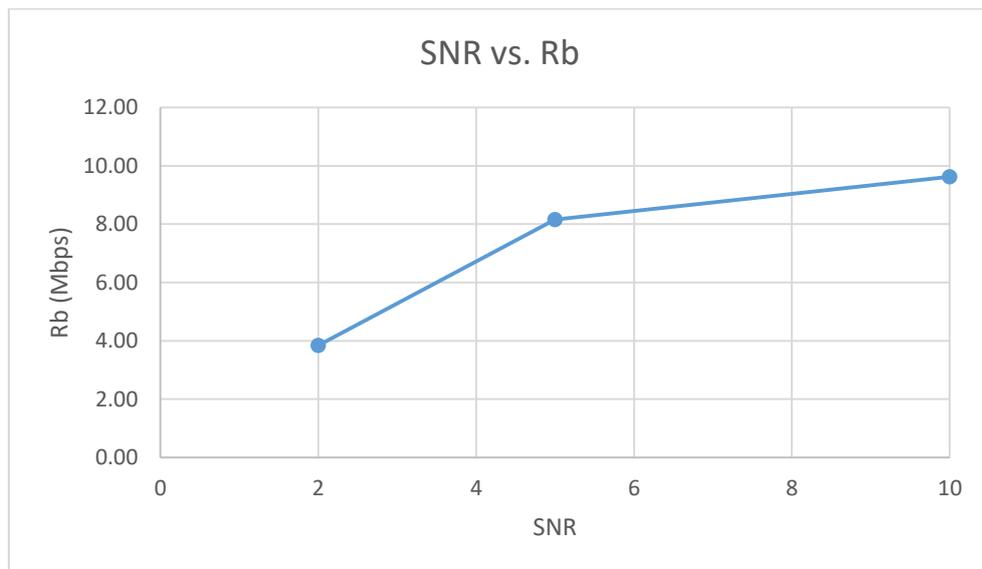
**Figura 38. SNR vs. BER del sistema con modulación QPSK, secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal OUTDOOR B.**

En la Figura 39, se puede observar que tanto los valores reales como los simulados nos proporcionan una tendencia muy parecida, aunque el valor simulado nos da valores de BER menores al real, lo cual se produce debido a que adicionalmente a los efectos del canal emulado en el sistema hay que añadirle la pérdida de potencia del canal real por el que se transmitió la señal.



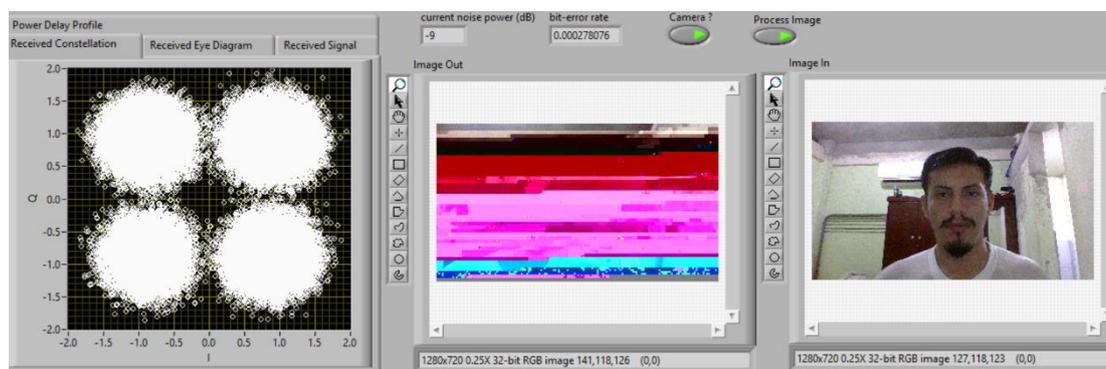
**Figura 39. SNR vs. BER (Simulado y Real) del sistema con una secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal OUTDOOR B.**

Finalmente se realizó una verificación de la capacidad del sistema para diferentes velocidades de transmisión, donde se encontró que el sistema funciona recuperando la imagen donde se puede observar que mientras mayor sea el SNR es posible transmitir a una velocidad mayor como se muestra a continuación:



**Figura 40. SNR vs. Rb del sistema con modulación QPSK, una secuencia de entrenamiento Willard 13 en el Canal INDOOR A.**

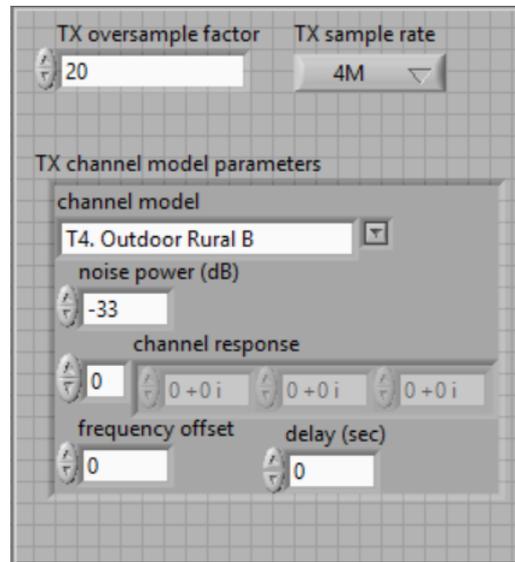
En la Figura 41 se puede observar el efecto que la interferencia del canal produce en la imagen recibida.



**Figura 41. Imagen distorsionada por el efecto del ruido en el Canal INDOOR A.**

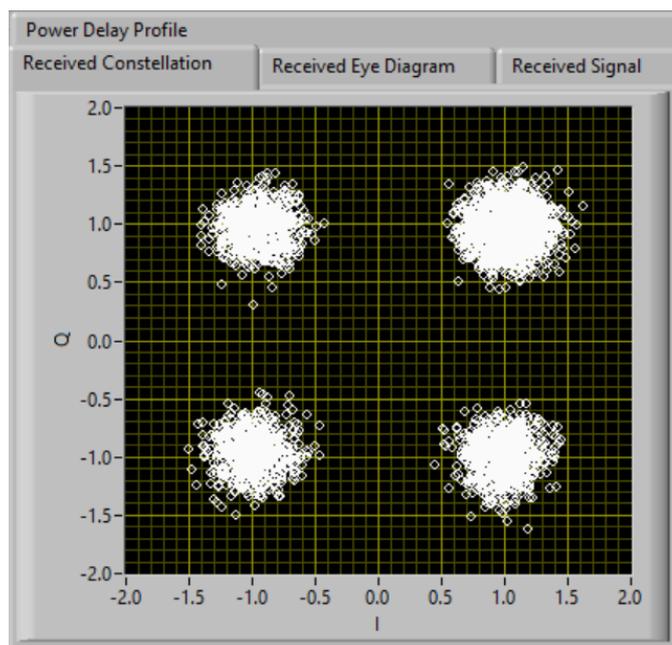
A continuación se muestran varios parámetros de configuración que se utilizaron para probar el sistema.

La Figura 42 se muestra los parámetros que se configuraron para realizar las diferentes pruebas variando la tasa de transmisión y también parámetros del canal como son el modelo y el ruido introducido.



**Figura 42. Parámetros de Configuración en el Transmisor.**

La Figura 43 muestra la constelación QPSK recibida en la cual se puede observar el efecto del canal haciendo que los puntos de la constelación se vean dispersos alrededor del valor que le corresponde de acuerdo a esta modulación.



**Figura 43. Constelación con corrección de trama utilizando algoritmo Moose.**

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos para las diferentes secuencias de entrenamiento para ecualizadores directo e indirecto en un canal Multitrayectoria se concluye que:

El método de detección de trama de Moose tiende a fallar para valores bajos de SNR debido a que como la señal está distorsionada esto provoca la presencia de varios picos de correlación entre la secuencia de entrenamiento y la trama de datos recibidos generando mayor probabilidad de error.

Se obtuvo que a una mayor longitud de la secuencia de entrenamiento se obtiene un menor BER, siendo la secuencia de Willard 13 la que mejor resultados dio dado que al tener mayor longitud el algoritmo de corrección de trama y el de ecualización aprovechan mejor sus propiedades de autocorrelación.

Al comparar la modulación QPSK con PI/4 QPSK se obtuvo que QPSK es capaz de tener menores valores de BER por lo que es más aconsejable usarlo en vez de PI/4 QPSK.

Se obtuvo que ambos ecualizadores dieron buenos resultados eliminando los efectos del canal en la señal, aunque el ecualizador directo tuvo mejor respuesta a valores menores de SNR comparado con el indirecto, debido a que el método directo evita propagar el efecto del ruido al no calcular el canal

estimado como si lo hace el método indirecto sino que directamente calcula el ecualizador del canal.

La transmisión de una imagen en este sistema inalámbrico desarrollado es posible, pero es necesario reducir bastante la calidad debido a que el proceso de convertir y enviar los bits hace que el proceso de emisión y recepción se vuelvan muy lentos por la cantidad de procesos que exigen al computador. Por lo que las pruebas se realizaron con una calidad de imagen reducida. Adicionalmente cuando se tienen valores de BER aunque sean pequeños pueden causar que el módulo de LabView que convierte a imagen puede fallar provocando un error y deteniendo la recepción.

El presente proyecto se puede expandir agregando al sistema otras herramientas para corrección y recuperación de bits como codificadores de canal lo cual mejoraría la capacidad del sistema al recuperar la imagen con valores de ruido mayores, también se puede realizar comparaciones con otros métodos de ecualización lineales o no lineales y comprobar así cuales son más óptimos bajo estas condiciones analizadas.

## BIBLIOGRAFÍA

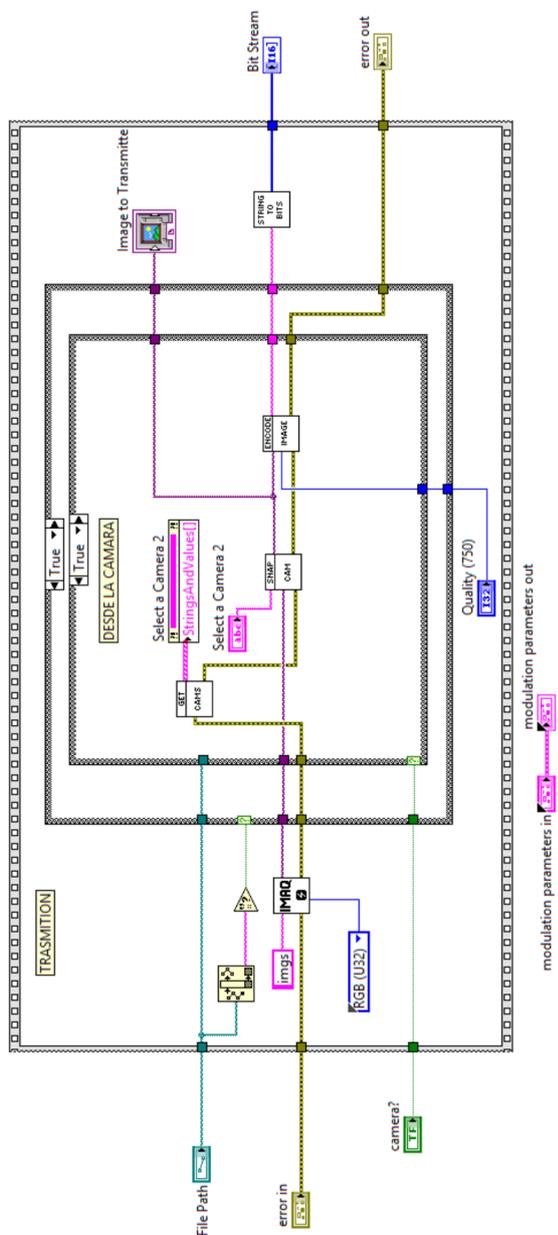
- [1] Experts Mind, "CDMA transmission model, Electrical Engineering", [En línea]. Disponible: <http://www.expertsmind.com/questions/cdma-transmission-model-30134774.aspx>. [Último acceso: 22 09 2016].
- [2] B.P.Lathi, "Modern Digital and Analog Communication System", Third Edition, Oxford University Press, 1998.
- [3] Thomas Klinger Ph.D, "Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision", Prentice Hall.
- [4] National Instruments, "Software NI Vision Acquisition - National Instruments", 2016. [En línea]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/12892>. [Último acceso: 22 09 2016].
- [5] National Instruments, "Módulo Vision Development - National Instruments", 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/vision/esa/>. [Último acceso: 22 09 2016].
- [6] Robert w. Heat Jr. Ph.D., PE. "Digital Wireless Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP", National Technology and Science Press
- [7] Wellington Espinoza, Maricela Freire, "Diseño, simulación e implementación de un esquema de detección de trama y de corrección del desplazamiento de frecuencia en un sistema de comunicación inalámbrico de una sola portadora", Artículo de Tesis de Grado – FIEC - ESPOL.
- [8] Simon Haykin, "Communication System", Fourth Edition, Jhon Wiley and Sons, Inc, 2001
- [9] Bernard Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", Second Edition, Prentice Hall.

- [10] Carlos Vélez, Mathew Kortum, Boris Ramos Ph.D, "Performance comparison of linear equalization systems for wireless communications under Rayleigh channel", IEEE Article.

# ANEXOS

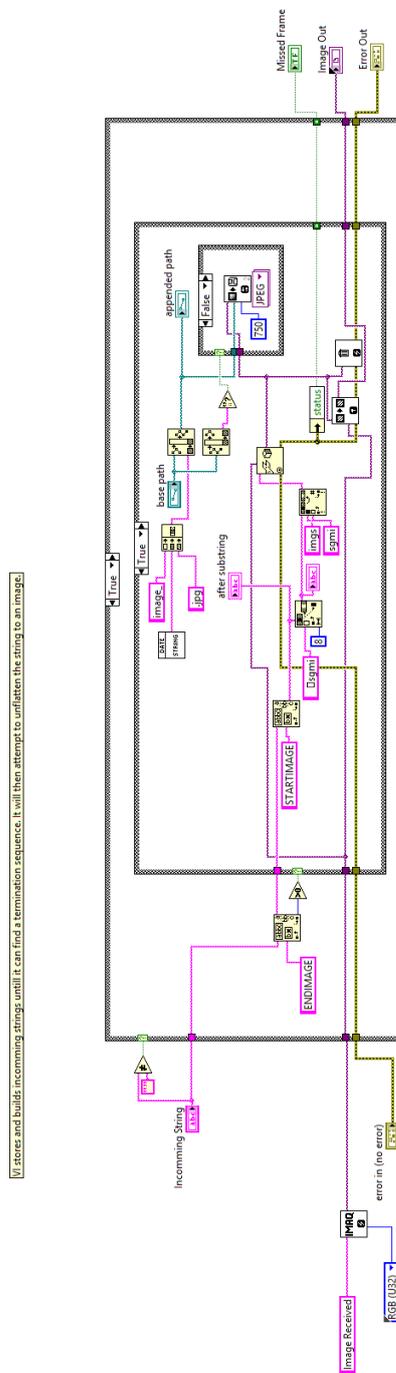
## ANEXO 1

### DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL IMAGE SOURCE



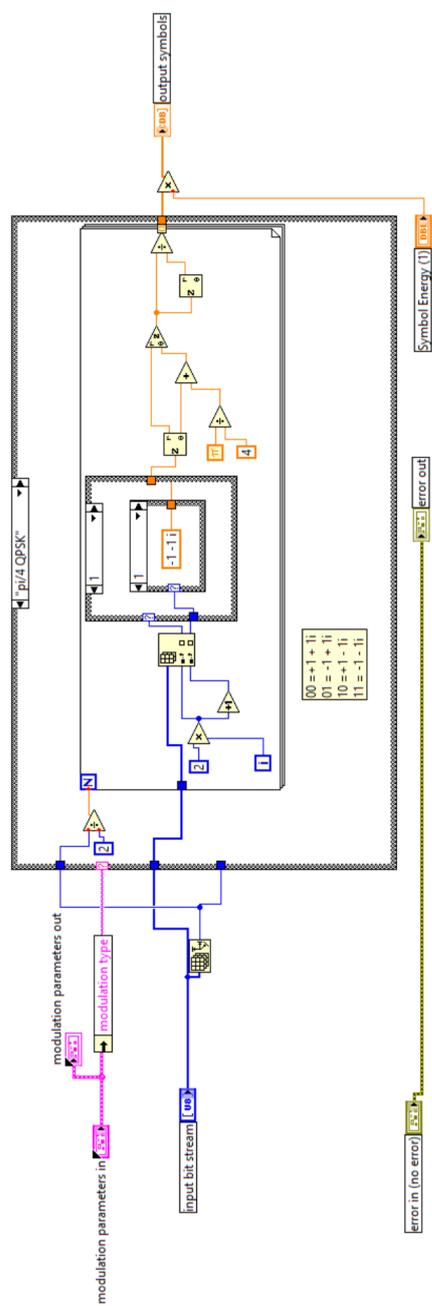
## ANEXO 2

### DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DECODIFICADOR DE LA IMAGEN



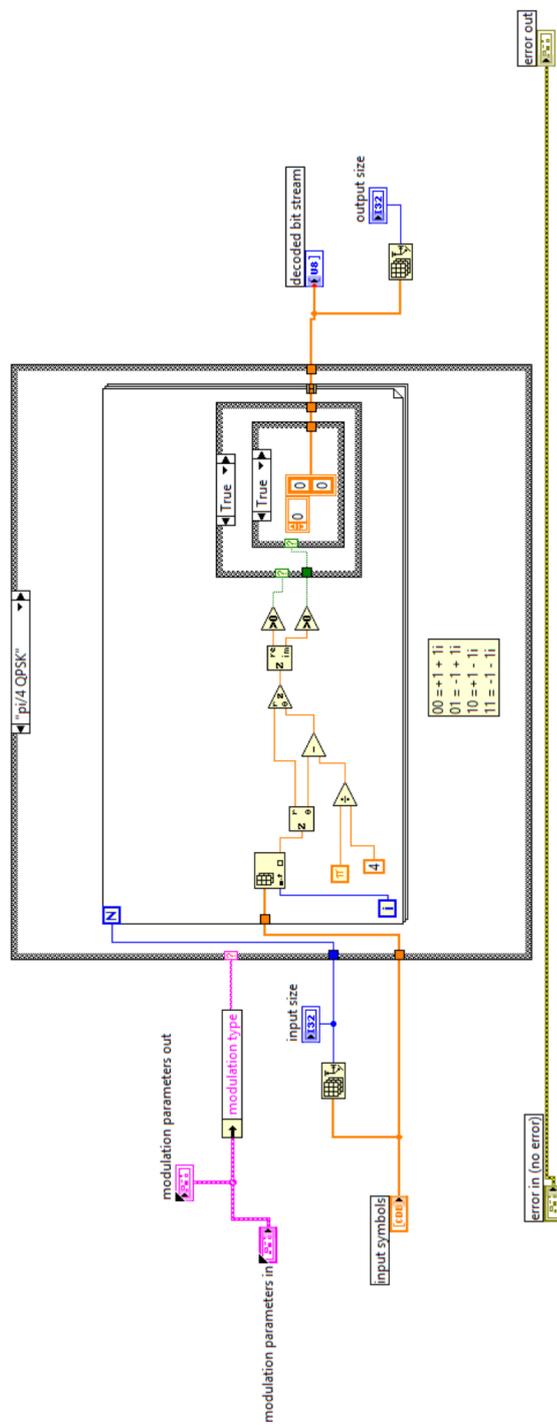
## ANEXO 3

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL MODULADOR PI/4 QPSK



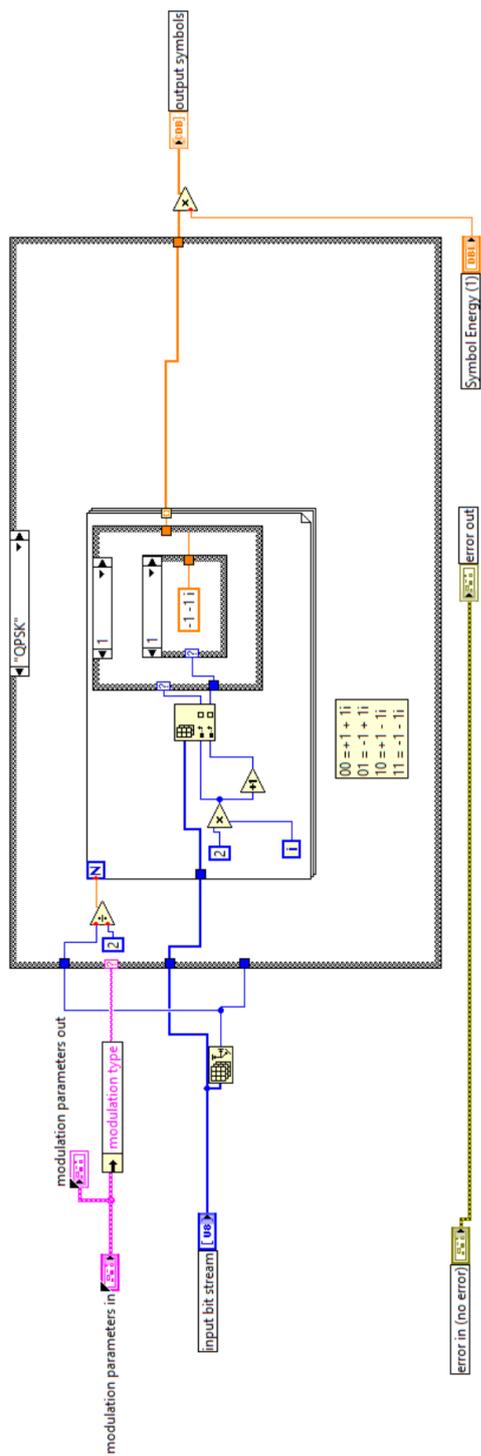
## ANEXO 4

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DEMODULADOR PI/4 QPSK



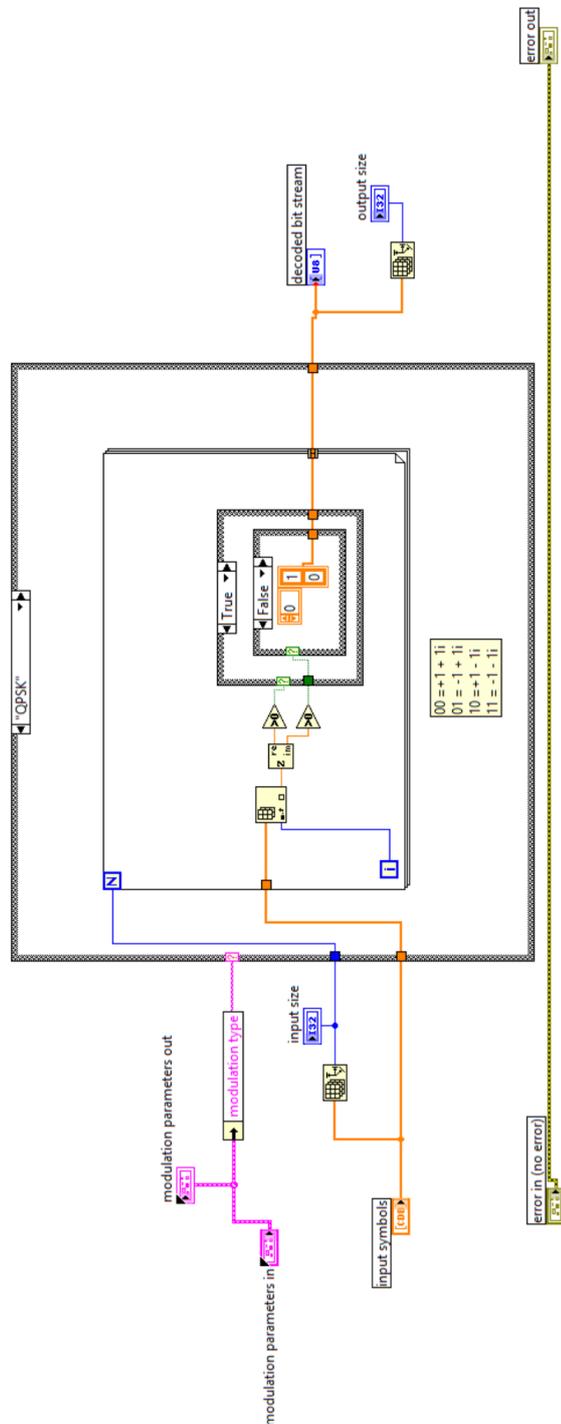
## ANEXO 5

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL MODULADOR QPSK



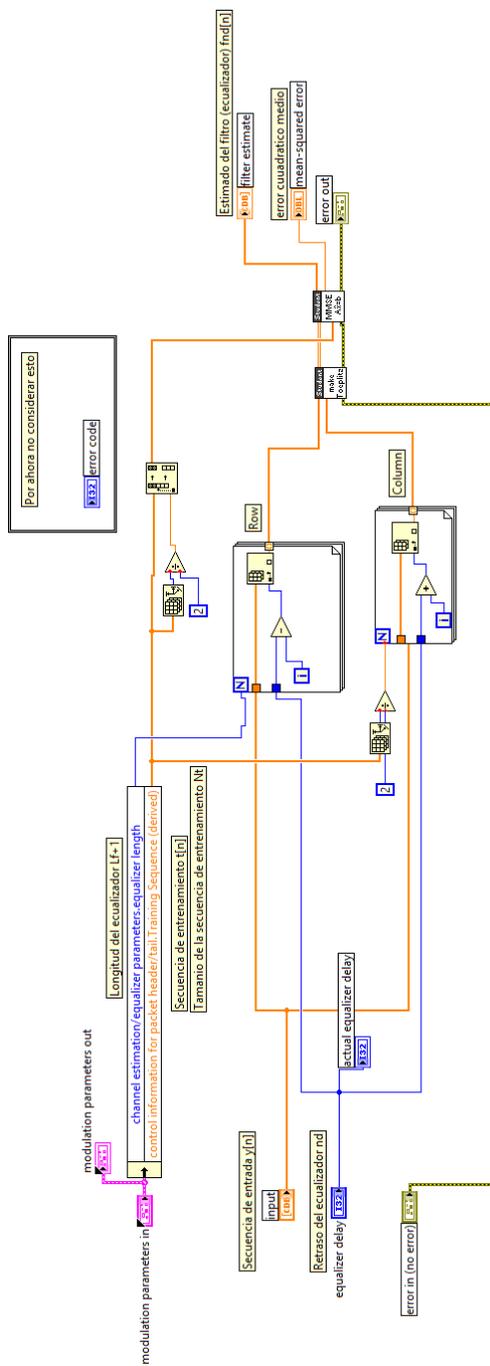
### ANEXO 6

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DEMODULADOR QPSK



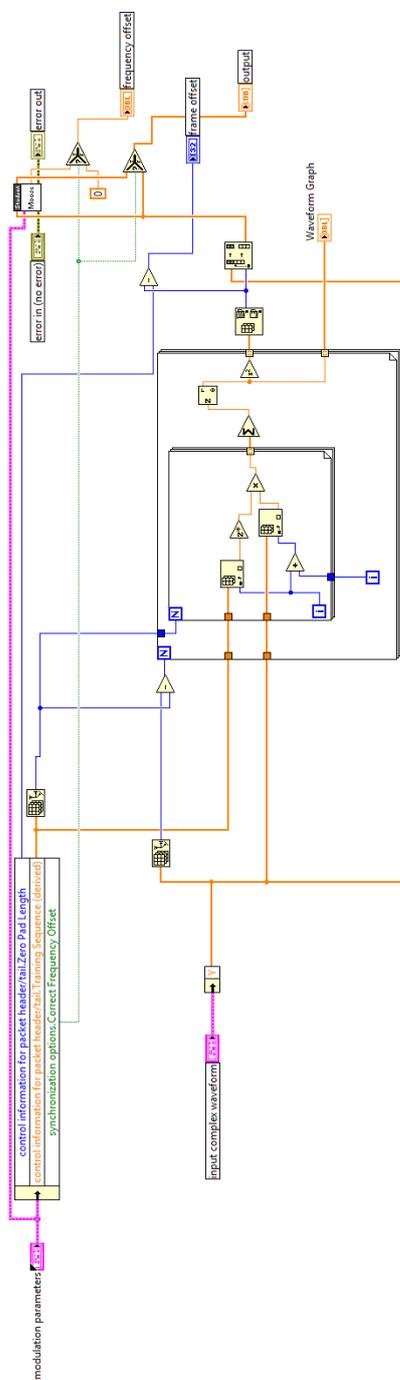
## ANEXO 7

### DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DETECTOR DE TRAMA MOOSE



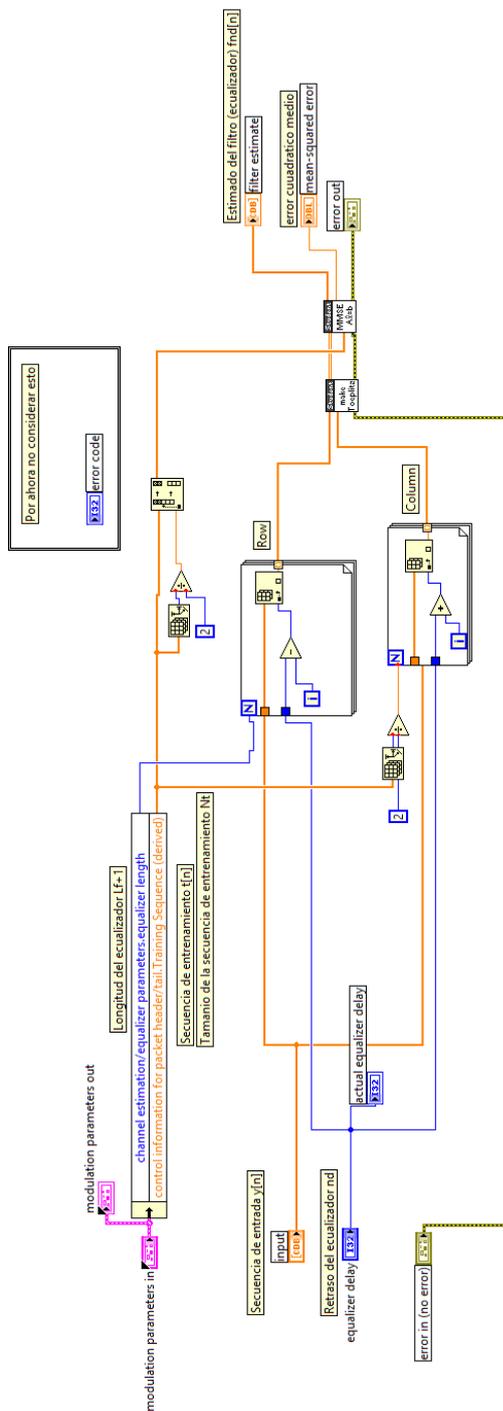
## ANEXO 8

### DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL DETECTOR DE TRAMA SLIDING CORRELATOR



## ANEXO 9

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL ECUALIZADOR DIRECTO



## ANEXO 10

## DIAGRAMA DE BLOQUE EN LABVIEW DEL INDIRECTE EQUALIZER

