

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Implementación y verificación de un enlace para transmisión de video usando Dispositivos de Radio Definidos por Software NI USRP-2920

Ronny Sebastián Bolaños Gómez

Ingeniería Electrónica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 20 de Mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Implementación y verificación de un enlace para transmisión de
video usando Dispositivos de Radio Definidos por Software NI
USRP-2920**

Ronny Sebastián Bolaños Gómez

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

René Játiva, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 24 de Mayo de 2021

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Ronny Sebastián Bolaños Gómez

Código: 00129119

Cédula de identidad: 1722216908

Lugar y fecha: Quito, Mayo de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

El presente proyecto de titulación implementa un enlace para transmisión y recepción de video a través de Radios Definidos por Software (SDR), particularmente utilizando equipos National Instruments NI USRP-2920. La configuración tanto del transmisor como del receptor se la realizó en LabVIEW, puesto que es un entorno de programación amigable que permite establecer los parámetros de operación y las funcionalidades de cada radio, y facilita realizar el seguimiento del proceso que se le da a la señal desde su adquisición hasta su transmisión por un lado y desde su recepción hasta su visualización en tiempo real en el otro extremo. La transmisión de video se realiza usando esquemas típicos de modulación digital, como son QPSK y 64QAM. Los equipos se configuraron de tal forma de no sólo comprobar subjetivamente la correcta transmisión del video, sino también de evaluar el rendimiento del canal de transmisión con el uso de herramientas estándar típicas en la comprobación de enlaces de comunicaciones digitales como son los diagramas de constelación y el diagrama de ojo. Para este fin, los USRPs fueron también configurados para efectuar el procesamiento digital sobre las señales, de forma de posibilitar la visualización de estos resultados, supliendo la necesidad del uso de equipamiento de laboratorio adicional como el Analizador de Espectros o el Analizador Vectorial de redes

Palabras clave: Transmisión, Recepción, SDR, USRP, LabVIEW, Modulación digital.

ABSTRACT

This current project implements a link for video transmission and reception through Software Defined Radios (SDR), particularly the National Instruments equipment USRP-2920. The configuration of both the transmitter and the receiver was carried out in LabVIEW, since it is a friendly programming environment that allows to establish the operating parameters and functionalities of each radio and eases the monitoring of the process given to the signal from its acquisition to its transmission at one side and from its reception to its real-time display at the other end. Video transmission is performed using typical digital modulation schemes, such as QPSK and 64QAM. The equipment was configured in such a way as not only subjectively check the correct transmission of the video, but also to evaluate the performance of the transmission channel with the use of typical standard tools in the verification of digital communication links such as constellation diagrams and the eye diagram. For this purpose, the USRPs were also configured to perform digital processing on the signals, to allow the visualization of these results, supplying the need for the use of additional laboratory equipment such as the Spectrum Analyzer or the Vector Network Analyzer.

Keywords: Transmission, Reception, SDR, USRP, LabVIEW, Digital modulation.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	11
Desarrollo del Tema	12
NI USRP-2920	12
Características	13
Panel frontal y posterior	13
Arquitectura	15
Antena	17
Integración con LabVIEW	17
Modulaciones	19
Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)	20
Modulación 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	21
Configuración NI USRP-2920	23
Conexión NI USRP-2920 con PC	23
Configuración de dirección IP de computadora	23
Interconexión de NI USRP-2920 y computadora	24
Implementación del enlace de transmisión de video	25
Arquitectura del sistema de transmisión-recepción	25
Diagramas de bloques de transmisión-recepción	26
Monitor de espectro electromagnético	26
Transmisión de video-Modelo 1	27
Transmisión de video-Modelo 2	30
Resultados de transmisión de video	33
Prueba subjetiva de transmisión de video	33
Evaluación de la calidad del enlace	39
Futuras Implementaciones	39
Conclusiones	40
Referencias bibliográficas	42
Anexo A: Representación de bits en modulación 64-QAM	43
Anexo B: Parámetros de operación de transmisión y recepción	45
Anexo C: Operador de colas de LabVIEW	46
Anexo D: Proceso de transmisión de video del modelo 1	47
Anexo E: Proceso de transmisión de video del modelo 2	55
Anexo F: Pruebas de disponibilidad de frecuencias	63
Anexo G: Evaluación de la calidad del enlace	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Módulos NI-USRP en LabVIEW (National Instruments, 2019)	18
Tabla 2: Descripción de fases de modulación QPSK	21
Tabla 3: Módulos IMAQ-LabVIEW (Foundation et al., 2021)	27
Tabla 4: Resultados de transmisión de video en modulación QPSK sin AWGN	34
Tabla 5: Resultados de transmisión de video en modulación 64-QAM sin AWGN.....	35
Tabla 6: Resultados de transmisión de video en modulación QPSK con -40 dB de AWGN.....	36
Tabla 7: Resultados de transmisión de video en modulación 64-QAM con -40 dB de AWGN.....	37
Tabla 8: Representación de bits de modulación 64-QAM	43
Tabla 9: Parámetros de operación del transmisor.....	45
Tabla 10: Parámetros de operación del receptor	45
Tabla 11: Operador de colas de LabVIEW	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: NI USRP-2920 (National Instruments, 2019).....	12
Figura 2: Panel frontal y posterior de NI USRP-2920 (National Instruments, 2019)	14
Figura 3: Diagrama de bloque del USRP-2920 (National Instruments, 2019).....	15
Figura 4: Antena VERT400 (Ettus Research, 2021)	17
Figura 5: Señal periódica con amplitud, frecuencia y fase (Arnedo Moreno, 2013)	19
Figura 6: Diagrama de constelación QPSK (Janneth & Vargas Asanza, 2016).....	21
Figura 7: Diagrama de constelación 64-QAM (Janneth & Vargas Asanza, 2016)	22
Figura 8: Propiedades de puerto Ethernet del computador.....	24
Figura 9: Parámetros de dirección IP estática del computador	24
Figura 10: NI USRP Configuration Utility	25
Figura 11: Arquitectura del sistema de transmisión y recepción	25
Figura 12: Diagrama de bloques del Transmisor	26
Figura 13: Diagrama de bloques del Receptor	26
Figura 14: Panel frontal del monitor de espectro electromagnético	27
Figura 15: Panel frontal del VI transmisor en LabVIEW-Modelo 1	28
Figura 16: Diagrama de bloques del VI transmisor-Modelo 1	28
Figura 17: Panel frontal del receptor en LabVIEW-Modelo 1	29
Figura 18: Diagrama de bloques del VI receptor-Modelo 1	29
Figura 19: Panel frontal del simulador en LabVIEW-Modelo 1	30
Figura 20: Diagrama de bloques del VI simulador-Modelo 1	30
Figura 21: Panel frontal del VI transmisor en LabVIEW-Modelo 2	31
Figura 22: Diagrama de bloques del VI transmisor-Modelo 2	31
Figura 23: Panel frontal del receptor en LabVIEW-Modelo 2	32
Figura 24: Diagrama de bloques del VI receptor-Modelo 2	32
Figura 25: Panel frontal del simulador en LabVIEW-Modelo 2	33
Figura 26: Conexión física de los dispositivos TX-RX con el PC	33
Figura 27: Panel frontal del receptor-Modelo 2	38
Figura 28: Espectro de señal recibida-Modelo 2	38
Figura 29: Generación de video-Modelo 1	47
Figura 30: Inicialización de transmisión-Modelo 1	47
Figura 31: Codificación de paquetes-Modelo 1	48
Figura 32: Modulación QPSK/64-QAM-Modelo 1	48
Figura 33: Preparación de datos I/Q-Modelo 1	49
Figura 34: Transmisión de datos-Modelo 1	49
Figura 35: Diagramas propios de la transmisión-Modelo 1	50
Figura 36: Recepción de datos-Modelo 1	50
Figura 37: Demodulador QPSK/64-QAM-Modelo 1	51
Figura 38: Decodificador de paquetes-Modelo 1	51
Figura 39: Diagramas propios de la recepción-Modelo 1	52
Figura 40: Recepción de video digital-Modelo 1	52
Figura 41: Ejecución simultanea de TX y RX para la simulación-Modelo 1.....	53
Figura 42: Diagramas resultantes de la transmisión de TX y RX- Modelo 1	54
Figura 43: Generación de video-Modelo 2.....	55
Figura 44: Inicialización de transmisión-Modelo 2.....	55
Figura 45: Codificación de paquetes-Modelo 2	56
Figura 46: Modulación QPSK/64-QAM-Modelo 2	56
Figura 47: Preparación de datos I/Q-Modelo 2	57
Figura 48: Transmisión de datos-Modelo 2.....	57

Figura 49: Diagramas propios de la transmisión-Modelo 2	58
Figura 50: Recepción de datos-Modelo 2.....	58
Figura 51: Demodulador QPSK/64-QAM-Modelo 2.....	59
Figura 52: Decodificador de paquetes-Modelo 2	59
Figura 53: Diagramas propios de la recepción-Modelo 2	60
Figura 54: Espectro de señal recibida-Modelo 2	60
Figura 55: Recepción de video digital-Modelo 1	61
Figura 56: Ejecución simultanea de TX y RX para la simulación-Modelo 1.....	62
Figura 57: Diagramas resultantes de la transmisión de TX y RX- Modelo 1	62
Figura 58: Primera prueba en el monitor de espectro electromagnético	63
Figura 59: Resultado de espectro de prueba 1	64
Figura 60: Segunda prueba en el monitor de espectro electromagnético	64
Figura 61: Resultado de espectro de prueba 2.....	65
Figura 62: Tercera prueba en el monitor de espectro electromagnético.....	66
Figura 63: Resultado de espectro de señal en la recepción de la transmisión	66
Figura 64: Cuarta prueba en el monitor de espectro electromagnético	67
Figura 65: Resultado de espectro de prueba 4.....	67
Figura 66: Parámetros modificados en el VI de transmisión de señal	68
Figura 67: Resultado de espectro como respuesta a la frecuencia establecida en TX....	68
Figura 68: Diagrama de constelación con ruido AWGN de -20 dB.....	69
Figura 69: Diagrama de ojo con ruido AWGN de -20 dB	70
Figura 70: SNR de ruido de -20 AWGN en modulación QPSK	70
Figura 71: Diagrama de constelación con ruido AWGN de -30 dB.....	71
Figura 72: Diagrama de ojo con ruido AWGN de -30 dB	72
Figura 73: SNR de ruido de -30 AWGN en modulación 64-QAM.....	72

INTRODUCCIÓN

El uso de Universal Software Radio Peripheral (USRP) ha incrementado durante los últimos años en la rama de telecomunicaciones; por ello, es viable analizar estos sistemas de comunicación mediante el NI USRP-2920. La transmisión de video en tiempo real tiene gran valor para la comunicación digital, siendo indispensable para la era tecnológica que se atraviesa y el motivo principal para desarrollar sistemas eficientes que permitan llevar a cabo este tipo de enlaces de comunicación utilizando varios recursos tecnológicos.

La tecnología SDR (Software Defined Radio) en la que se basa el USRP-2920 de la empresa americana National Instruments, permite diseñar, crear prototipos e implementar rápidamente sistemas inalámbricos de comunicación a través de un software de programación como LabVIEW; el cual permite crear una interfaz de control de la transmisión y recepción del enlace de video a partir de una frecuencia establecida. El enlace propuesto estará modulado por medio de dos tipos distintos de modulación, del cual se pretende realizar un análisis exhaustivo de sus resultados partiendo de la literatura y evaluando la eficiencia alcanzada por cada modulación digital del tipo QPSK y 64QAM.

Es de suma importancia identificar correctamente la frecuencia de trabajo para una transmisión en tiempo real dentro de los sistemas de comunicación digital, puesto que en el entorno existen frecuencias que son utilizadas por otros dispositivos y que pueden llegar a emitir algún tipo de interferencia o ruido provocando distorsión en la emisión y recepción de la señal; por ello, se considera explorar la disponibilidad de frecuencias a través de una monitor de espectro electromagnético, el cual permita identificar las bandas de frecuencia idóneas para ejecutar el enlace de transmisión de video en el que se ejecute a una frecuencia que denote eficiencia.

Con la finalidad de explorar el potencial que dispone este tipo de tecnología basada en hardware reconfigurable, adquirida por el Laboratorio de Comunicaciones de la USFQ, es pertinente hacer buen uso de los dos radios USRP-2920 para esta implementación, de la cual se espera obtener resultados relevantes que permitan el avance investigativo dentro de la rama y sean de gran utilidad para futuras implementaciones de sistemas inalámbricos de radiofrecuencia y comunicación.

DESARROLLO DEL TEMA

NI USRP-2920

NI USRP (Universal Software Radio Peripheral) de la serie 2920, es un transceptor de radiofrecuencia ajustable, que dispone un convertidor analógico-digital de alta velocidad junto con un convertidor digital-analógico que permite implementar un sistema de comunicación a través de software. El dispositivo dispone de procesadores basados en FPGA, host y terminales frontales de radiofrecuencia que permiten la conexión con antenas, ordenadores por medio de cable Gigabit Ethernet incluyendo el cable MIMO (Multiple Input-Multiple Output) para conexión de múltiples radios con sincronización de reloj. (Welch & Shearman, 2012)



Figura 1: NI USRP-2920 (National Instruments, 2019)

Características.

- Fabricado con frecuencias de RF en el rango de 50 MHz - 2,2 GHz cubriendo bandas GSM, GPS, TV, ISM, radio FM y radar.
- Contiene un ancho de banda de 20 MHz.
- Rango de alimentación de 12 a 15 vatios dentro de las operaciones típicas del dispositivo.
- Fuente de alimentación de CC conectada externamente de 3 A y 6 voltios.
- Rango de humedad sin condensación del 10% al 90%.
- Rango de temperatura de operación de $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Programable con el controlador NI-USRP en el software LabVIEW, Matlab y GNU Radio.
- ADC y DAC de alta velocidad para transmisión de señales de banda base I/Q hacia un ordenador.

Panel frontal y posterior.

Los conectores que provee el panel frontal del NI USRP-2920 disponen de características específicas dependiendo del campo de trabajo en el que se desee implementar radiocomunicación. Los terminales de canal RF del tipo SMA son exclusivamente para las antenas que se desee utilizar teniendo presente que el primer puerto es del tipo transmisor/receptor denominado *RX1/TX1* y el segundo es únicamente para antenas de recepción denominado como *RX2*. El puerto rectangular denominado en el panel principal como *MIMO EXPANSION*, es de utilidad al momento de disponer de una sincronización de reloj entre dos USRPs por medio de un cable MIMO (Multiple Input-Multiple Output) compatible con el dispositivo, que además dispone de un puerto cuadrado denominado como *Gb ETHERNET* en el cual se puede conectar al computador a través de un cable Gigabit Ethernet y el puerto RJ-45 disponible en el computador.

El conector *REF IN* del tipo SMA con una impedancia de 50Ω , permiten tener una señal de referencia externa del oscilador local (LO); por su parte el conector *PPS IN* permite disponer de una referencia del temporizador de pulsos por segundo. El puerto habitual para la alimentación *POWER* de 3A y 6V junto a los LEDs (A,B,C,D,E,F) que al estar encendidos determinan distintas operaciones del dispositivo como se detalla a continuación:

- LED A: transmitiendo
- LED B: enlace de cable MIMO
- LED C: recibiendo
- LED D: firmware cargado
- LED E: bloqueo de referencia
- LED F: CPLD cargado

En la parte posterior del NI USRP-2920 se encuentra un puerto para entrada de antena *GPS* que es opcional para algún tipo de implementación que lo requiera necesario así como el ventilados del equipo y su respectiva certificación de originalidad.

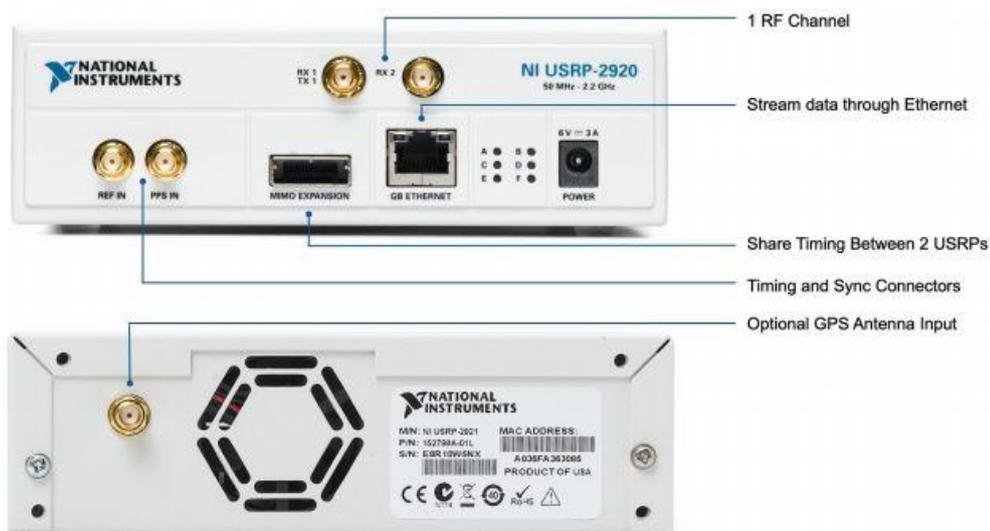


Figura 2: Panel frontal y posterior de NI USRP-2920 (National Instruments, 2019)

Arquitectura.

El USRP-2920 se encuentra conformado por dos niveles de tarjeta, el primer nivel es denominado como tarjeta madre o *motherboard* la cual dispone del módulo FPGA que se encarga del procesamiento en banda base junto a los convertidores analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) quienes se responsabilizan de la adquisición de las muestras y la comunicación con el procesador externo. La *daughterboard* o tarjeta hija, es el segundo nivel que se encarga netamente de la transmisión y recepción del dispositivo.

Como parte de la arquitectura del USRP-2920, se presenta la siguiente figura del diagrama de bloque el cual constituye la capa física del dispositivo y se identifica específicamente las direcciones de ejecución tanto para la transmisión de señales como para la recepción.

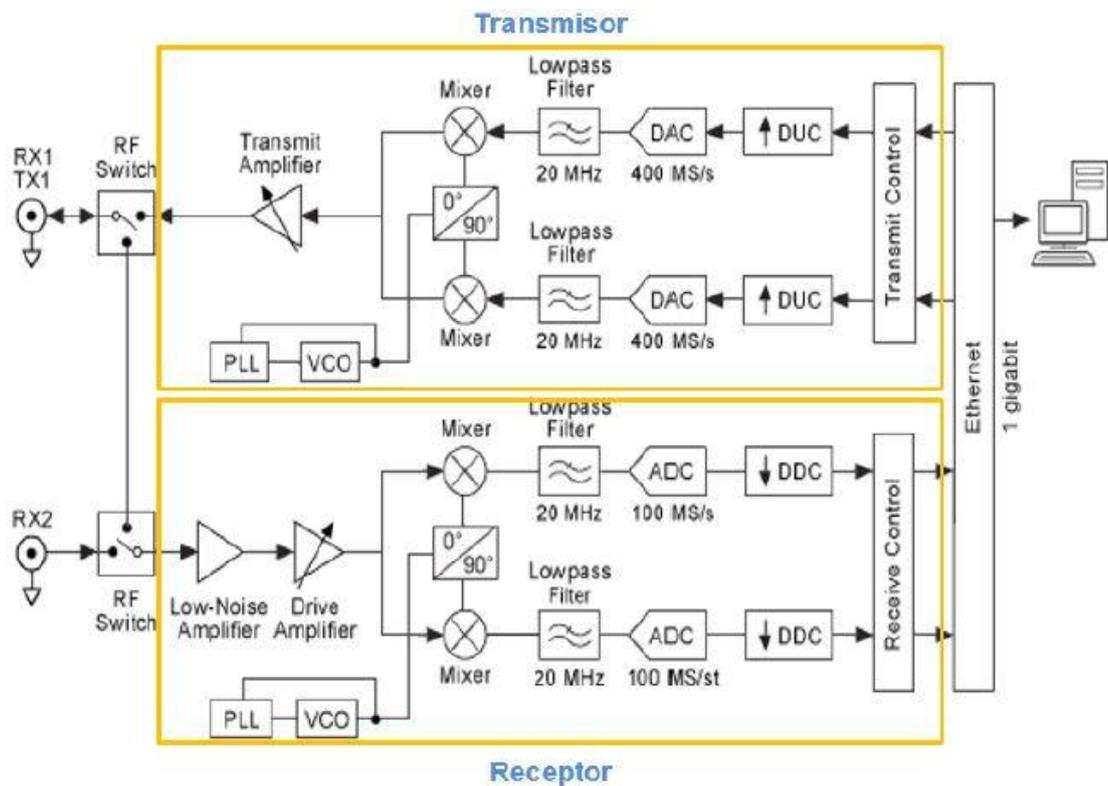


Figura 3: Diagrama de bloque del USRP-2920 (National Instruments, 2019)

Descripción del funcionamiento de cada bloque perteneciente a la arquitectura del módulo NI USRP-2920 al transmitir y recibir una señal se especifica a continuación:

Transmisor

- **Digital Upconverter (DUC):** muestra la señal de banda base desde la frecuencia de sampling establecida en la PC a 400MS/s.
- **Digital to Analog Converter (DAC):** convierte una señal digital en señal analógica a una velocidad de 400MS/s.
- **Lowpass Filter:** limita el ancho de banda de la señal analógica y es la resultante del proceso de conversión digital-analógico.
- **Mixer:** combina la señal de banda base con una señal portadora específica.
- **Transmitter Amplifier:** genera aumento de potencia a la señal RF.
- **Transmit Control:** según los parámetros que se establezcan, configura la señal I/Q para ser enviada.

Receptor

- **Low-Noise Amplifier (LNA):** recupera la señal analógica RF sin agregar ruido.
- **Driver Amplifier:** recupera la señal digital que ha sido recibida por el LNA.
- **Mixer:** combina la señal de banda base con una señal portadora específica.
- **Analog to Digital Converter (ADC):** digitaliza la señal a una velocidad de 100MS/s.
- **Digital Down Converter (DDC):** muestrea a señal de 100MS/s a la velocidad que sea especificada.
- **Receive Control:** sintetiza las señales I/Q para ser enviadas.

Antena.

La antena transeptora VERT400, es un tipo de antena con un conector SMA que se ajuste de acuerdo con las bandas de frecuencias con las que trabaja el USRP-2920; dispone tres bandas de frecuencia omnidireccional (144 MHz, 400MHz, 1200MHz) y opera a una potencia máxima de 10 watts.



Figura 4: Antena VERT400 (Ettus Research, 2021)

Integración con LabVIEW.

LabVIEW cuenta con las herramientas necesarias para permitir la comunicación bidireccional entre USRP y ordenador a través de paneles interactivos basados en el diseño e implementación de VIs (Virtual Instruments) dentro del programador; el cual requiere del kit software y hardware de NI USRP-2920 para su funcionamiento que viene dado por:

- NI USRP Software Suite DVD.
 - NI LabVIEW Modulation Toolkit
 - NI Acquisition Software Application Software support
 - NI Vision Development Module support
 - NI USRP Driver support.
- Radio NI USRP-2920.
- Adaptador de corriente.
- Cable Gigabit Ethernet

- Atenuador de 30 dB.
- Cable SMA-SMA.

Para implementar la comunicación entre el software y el hardware NI-USRP a través de LabVIEW, es necesario el uso de módulos básicos que permitirán realizar operaciones de lectura y escritura de datos así como la apertura y cierre de sesiones que se van ejecutando en el transcurso de la transmisión. Los principales módulos de comunicación de NI-USRP se detallan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Módulos NI-USRP en LabVIEW (National Instruments, 2019)

Módulo NI-USRP	Descripción
	niUSRP Open Tx Session: abre una sesión de transmisión Tx al dispositivo que se especifique en la entrada y devuelve la identificación de sesión a la salida.
	niUSRP Configure Signal VI: configura los parámetros de la señal de transmisión Tx.
	niUSRP Write Tx Data (poly) VI: escribe datos en la lista de canal que se especifique.
	niUSRP Close Session VI: cierra el identificador de sesión del dispositivo.
	niUSRP Open Rx Session: abre una sesión de recepción Rx al dispositivo que se especifique en la entrada y devuelve la identificación de sesión a la salida.
	niUSRP Configure Signal VI: configura los parámetros de la señal de transmisión Rx.
	niUSRP Initiate VI: inicializa la adquisición de Rx.
	niUSRP Fetch Rx Data (poly) VI: recoge datos de la lista de canal que fue especificada
	niUSRP Abort VI: detiene la adquisición iniciada con anterioridad.
	niUSRP Close Session VI: cierra el identificador de sesión del dispositivo.

Modulaciones

La modulación es el proceso en el cual se altera sistemáticamente los parámetros de una onda conocida en telecomunicaciones como portadora o *carrier*, basada en el voltaje instantáneo de la moduladora (Universitaria, 2006). A la portadora por lo general se la representa como una onda senoidal que viene dada por la siguiente expresión:

$$c(t) = E_C \cos (w_c t + \varphi)$$

De la expresión antes descrita, es relevante indicar que existen tres parámetros importantes de la portadora como la amplitud E_C , la frecuencia w_c y a la fase φ .

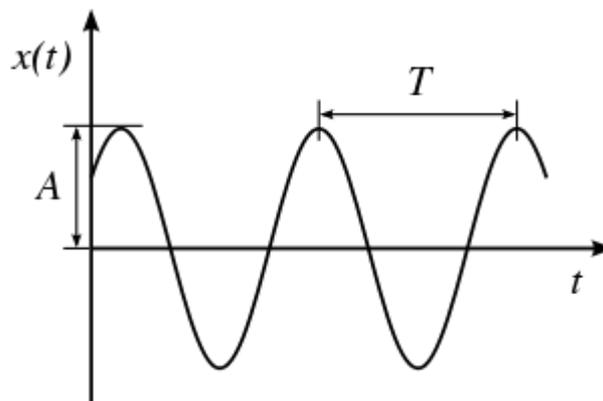


Figura 5: Señal periódica con amplitud, frecuencia y fase (Arnedo Moreno, 2013)

Estos parámetros pueden variar el mensaje según sean establecidos dentro de la portadora; por otro lado, el mensaje o señal moduladora contiene la información que se requiere transmitir y viene expresada de la siguiente manera:

$$m(t) = E_m \cos (w_m)$$

La modulación digital permite ejecutar el proceso de transformación de los símbolos en señales que pueden ser transmitidas a través de un canal de comunicación inalámbrico. Seguidamente del proceso de modulación, se ejecuta el proceso de demodulación con el fin de extraer la información de la portadora.

Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) en sus siglas en inglés, utiliza dos constelaciones BPSK, que tiene una diferencia de fase de 180° entre sus dos símbolos constituyentes. La señal BPSK viene representada por:

$$\pm A \cos(2\pi ft)$$

Teniendo en cuenta que las señales seno y coseno son ortogonales, lo que significa que su producto interior calculado como la integral en el tiempo de su producto instantáneo es igual a cero; es viable separar dichas señales por completo en la recepción al usar técnicas de detección de coherentes y de esta forma enviar simultáneamente dos bits en cuadratura sin incrementar el ancho de banda. La señal resultante que se transmita tiene 4 posibles formas de representación:

$$\begin{aligned} &+ \cos(2\pi ft) + \text{sen}(2\pi ft) \\ &- \cos(2\pi ft) - \text{sen}(2\pi ft) \\ &+ \cos(2\pi ft) - \text{sen}(2\pi ft) \\ &- \cos(2\pi ft) + \text{sen}(2\pi ft) \end{aligned}$$

A partir de propiedades trigonométricas, los cuatro términos entre paréntesis antes señalados se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} &\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{4}\right) \\ &\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{3\pi}{4}\right) \\ &\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{5\pi}{4}\right) \\ &\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{7\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

Teniendo presente que este tipo de modulación transmite datos en pares de bits, los cuales cada bit será codificado como un cambio de fase de las 4 existentes, con respecto a la señal del símbolo anterior como lo describe la siguiente tabla:

Tabla 2: Descripción de fases de modulación QPSK

Fase	Ángulo de fase (rad)	Ángulo de fase (°)	Código de bits	Símbolos
1	$\frac{\pi}{4} \text{ rad}$	45°	00	1+i
2	$\frac{3\pi}{4} \text{ rad}$	135°	10	-1+i
3	$\frac{5\pi}{4} \text{ rad}$	225°	11	-1-i
4	$\frac{7\pi}{4} \text{ rad}$	315°	01	1-i

Una vez establecidos los ángulos respectivos a cada fase de este tipo de modulación, es posible obtener el diagrama de constelación QPSK como se indica en la figura 7:

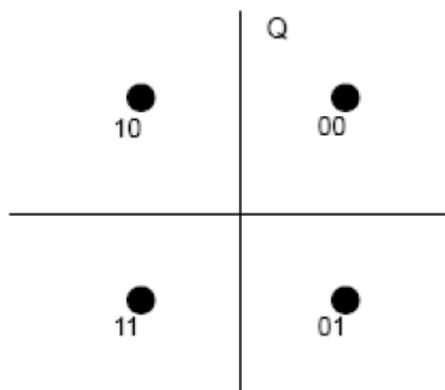


Figura 6: Diagrama de constelación QPSK (Janneth & Vargas Asanza, 2016)

Modulación 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

La Modulación de Amplitud en Cuadratura simplificada por sus siglas en inglés como QAM, es un tipo de modulación digital en la que se transportan varios bits con señales construidas a partir de una combinación lineal de dos señales (funciones base) en cuadratura (ortogonales) independientes, lo cual origina variaciones de amplitud y fase modulada. A pesar de estas variaciones, el ancho de banda de la señal no se modifica y más bien, la velocidad de transmisión aumenta, haciendo de esta técnica de modulación más eficiente en el uso del espectro radioeléctrico disponible. Por esta

razón, a mayor número de niveles de modulación QAM, mayor es la tasa de transmisión de la información, pero también es mayor la probabilidad de cometer errores en la detección de los símbolos recibidos. La modulación QAM incluye 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.

La técnica de modulación 64-QAM es muy eficiente pues soporta velocidades de transmisión arriba de los 28 Mbps sobre un canal simple de 6 MHz, al tener la capacidad de transmitir más bits por cada símbolo; sin embargo, es más susceptible al ruido e interferencias, por lo cual su uso se realiza en condiciones de compromiso entre la SNR disponible y el ancho de banda del canal de transmisión, que pueden obtener datos no tan confiables. El diagrama vectorial o de constelación de la modulación 64-QAM es característico por la separación simétrica de las fases dentro del plano, que al estar tan cercanos son susceptibles al ruido y la distorsión teniendo una tasa de error por bit (BER) más alta pero la energía promedio de la constelación sigue siendo la misma.

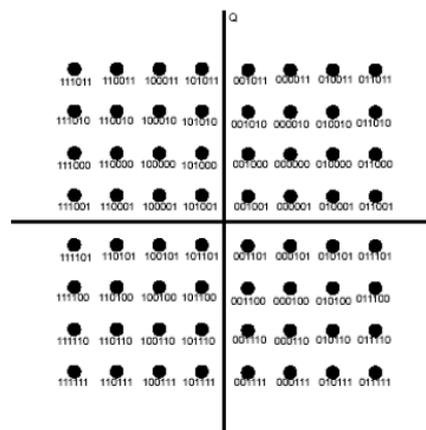


Figura 7: Diagrama de constelación 64-QAM (Janneth & Vargas Asanza, 2016)

Sabiendo que las telecomunicaciones digitales los datos son binarios, el número de puntos del diagrama de constelación es normalmente una potencia de 2; por ello, en la figura anterior se puede evidenciar que en cada cuadrante existen 16 puntos, cada punto representa 6 bits por lo antes mencionado $2^6 = 64$, y por eso se le adjudica el

nombre de 64-QAM. La representación de cada combinación de los 6 bits es representada a partir de la tabla 8 en el ANEXO A.

La modulación del tipo 64-QAM dispone de varias ventajas para el procesos de transmisión de video que se quiere implementar; una de ellas radica en la gran velocidad que dispone al enviar 6 bits por cada símbolo. Sin embargo, al incrementar los bits por símbolo se requieren sistemas de detección más sensibles que sean capaces de detectar y diferenciar los distintos valores de amplitud y fase que sean recibidos (Janneth & Vargas Asanza, 2016).

Configuración NI USRP-2920

Conexión NI USRP-2920 con PC.

1. Asignar un USRP-2920 como transmisor TX y otro USRP-2920 para la recepción RX de la transmisión.
2. Conectar las antenas VERT 400 a cada uno de los USRP-2920 en los terminales RX1/TX1 para los dos dispositivos.
3. Al USRP-2920 asignado como transmisor, conectar al computador a través del cable Gigabit Ethernet para entablar la comunicación.
4. Conectar el cable MIMO en el puerto *MIMO EXPANSION* para sincronización de reloj de ambos dispositivos.
5. Conectar al tomacorriente cada uno de los USRPs.

Configuración de dirección IP de computadora.

1. Acceder al panel de control
2. Dirigirse a **Centro de redes y recursos compartidos**
3. Seleccionar **Cambiar la configuración del adaptador**
4. Pulsar clic derecho en el puerto Ethernet y seleccionar **Propiedades**

5. Dentro de propiedades de Ethernet, seleccionar **Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)** como se muestra a continuación:

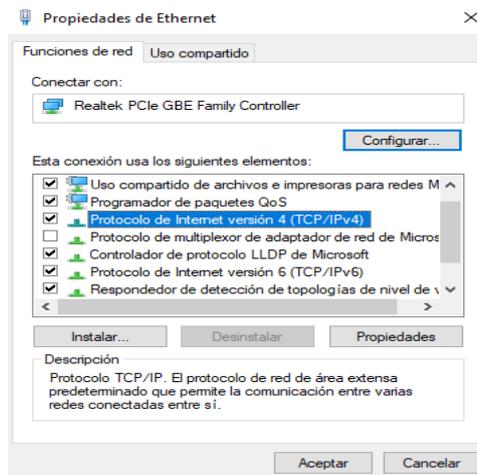


Figura 8: Propiedades de puerto Ethernet del computador

6. En propiedades del Protocolo de Internet versión 4, cambiar el IP a estático y asignar un IP diferente al de los USRPs manteniéndose en una misma subred como se muestra en la figura 10.

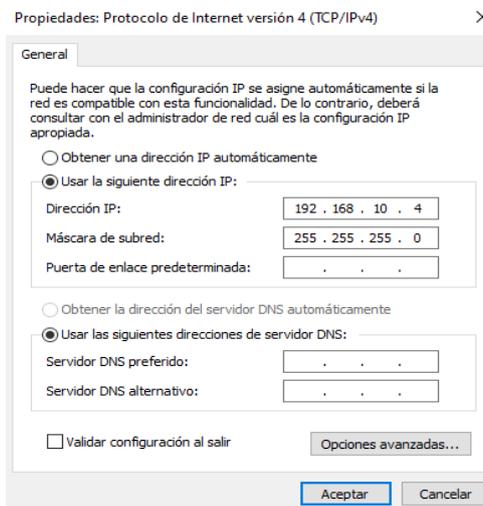


Figura 9: Parámetros de dirección IP estática del computador

Interconexión de NI USRP-2920 y computadora.

1. Ingresar al software NI-USRP **Configuration Utility**
2. Seleccionar **Find Devices** para ejecutar la búsqueda de los dispositivos

3. Aparecerán en el cuadro de dispositivos los dos USRPs encontrados con sus respectivas direcciones IP asignadas de la siguiente forma:

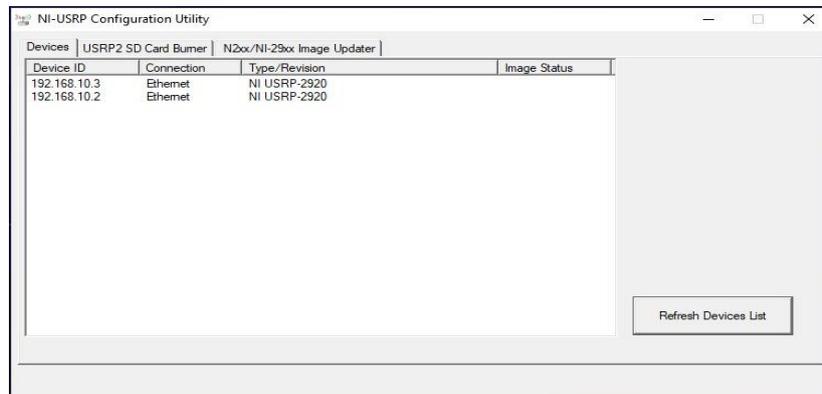


Figura 10: NI USRP Configuration Utility

Implementación del enlace de transmisión de video

Arquitectura del sistema de transmisión-recepción.

De acuerdo con lo estipulado para la generación del enlace de transmisión, los dispositivos serán conectados entre sí a través de cable MIMO provisto por el fabricante, junto con la interconexión de uno de los NI USRP 2920 al ordenador DELL Precision 3430 por medio de cable Gigabit Ethernet y utilizando las antenas VERT 400 para cada controlador.

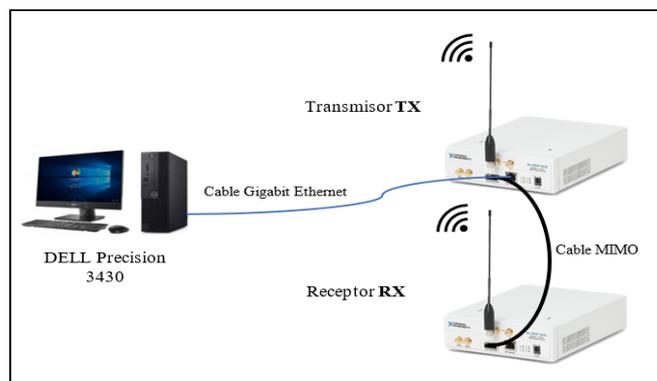


Figura 11: Arquitectura del sistema de transmisión y recepción

Diagramas de bloques de transmisión-recepción.

Los diagramas de bloques para implementar el sistema de comunicación entre el transmisor y el receptor para la transmisión de video en tiempo real vienen establecidos por las siguientes figuras detalladas a continuación:

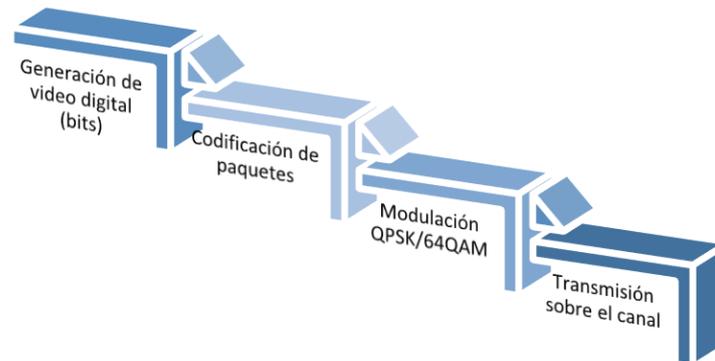


Figura 12: Diagrama de bloques del Transmisor

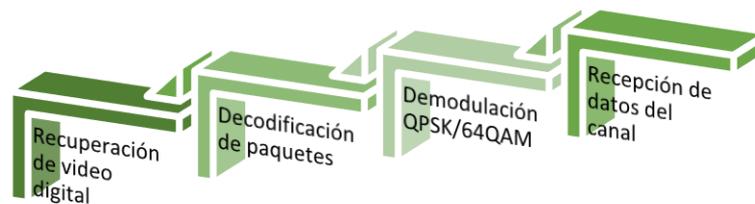


Figura 13: Diagrama de bloques del Receptor

Monitor de espectro electromagnético.

La implementación del monitor de espectro electromagnético tiene como finalidad explorar la disponibilidad del espectro dentro de las bandas de frecuencias implementadas en el proyecto para establecer la comunicación entre USRPs por medio del aire con el uso de sus antenas correspondientes. La verificación de disponibilidad de espectro con el uso del monitor se encuentra en el ANEXO F.

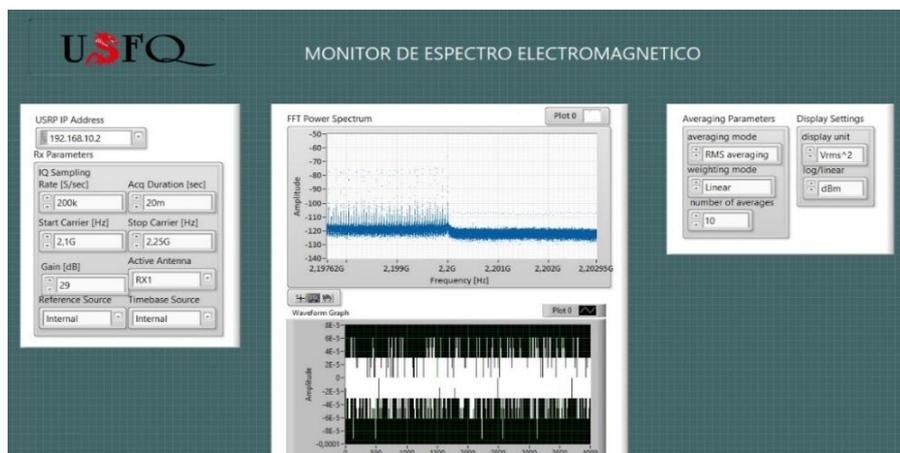


Figura 14: Panel frontal del monitor de espectro electromagnético

Transmisión de video-Modelo 1 .

Diseño del transmisor TX.

En base a los rangos de cada parámetro de operación de frecuencias de los NI USRP, se procede a diseñar en LabVIEW el transmisor con las consideraciones teóricas que deben ser tomadas en cuenta para la generación del enlace como muestra la tabla 9 del ANEXO B. Para generar la transmisión se debe utilizar una de las principales librerías para la adquisición de imagen como NI-IMAQ junto con sus módulos que permitirán generar video a través de una cámara de video digital como detalla la tabla 3.

Tabla 3: Módulos IMAQ-LabVIEW (Foundation et al., 2021)

Módulo IMAQ	Descripción
	IMAQ Create: este módulo crea un espacio de memoria en LabVIEW para la adquisición de imágenes para su lectura y escritura.
	IMAQ Open Camera: este módulo permite abrir una cámara externa/interna del ordenador.
	IMAQ Configure Grab: se asigna el método de grabación o adquisición de imagen para dar paso a su inicialización junto a un buffer interno para capturar y guardar imágenes constantemente.
	IMAQ Grab: se ejecuta tras primero ser ejecutado la configuración de grabación para recoger todos los datos de reproducción de video.
	IMAQ Dispose: el programa de adquisición de imagen/video ha terminado.

Es necesario implementar un operador de colas, el cual se encargará de almacenar información siendo este un búfer ordenado del tipo FIFO (First Input First Output) que ejecutará varias acciones sin saturar la memoria disponible en el desarrollador. El operador de colas existente en LabVIEW dispone de varios módulos que se detallan en la tabla 11 del ANEXO C; los cuales, permitirán ejecutar VIs y almacenar información a lo largo de la implementación del enlace de video. Para la implementación del primer modelo transmisor en LabVIEW, se iniciará por crear el VI principal basado en un proceso de transmisión típico de comunicaciones que serán detallados en el ANEXO D y que operará a una frecuencia de 2,2 GHz junto con los demás parámetros de configuración del sistema de transmisión.

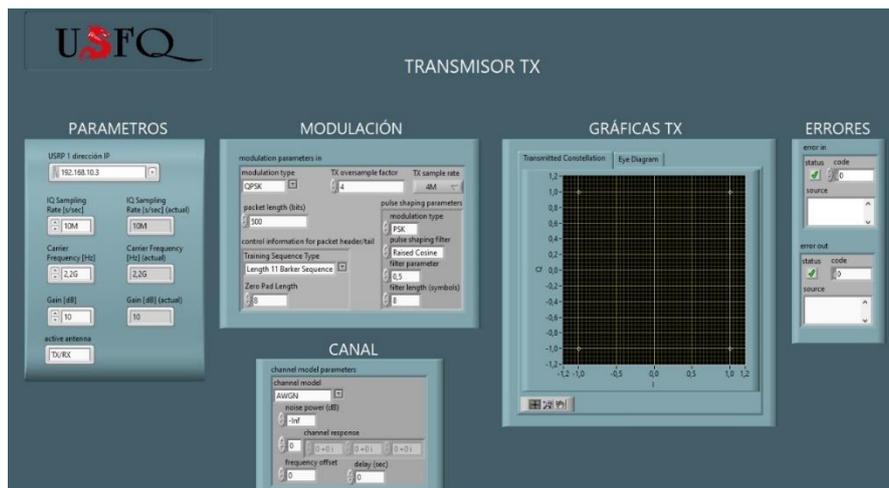


Figura 15: Panel frontal del VI transmisor en LabVIEW-Modelo 1

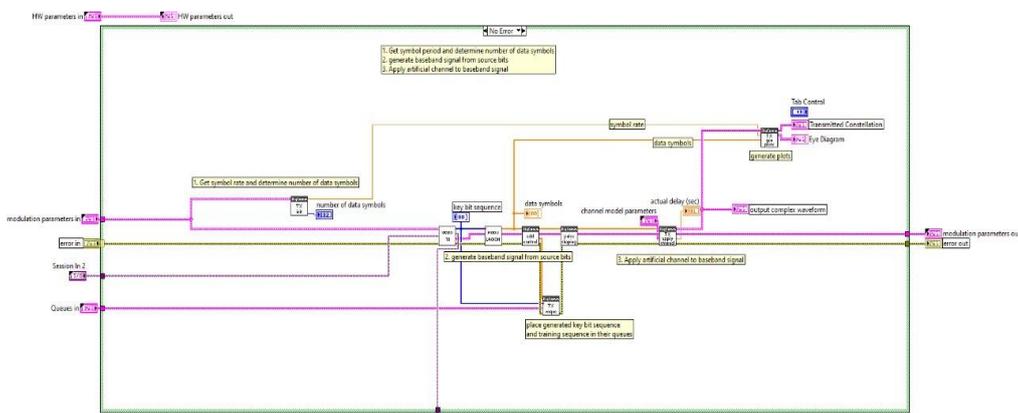


Figura 16: Diagrama de bloques del VI transmisor-Modelo 1

Diseño del receptor RX.

En base a los rangos de cada parámetro de operación de frecuencias de los NI USRP, se procede a diseñar en LabVIEW el receptor con las consideraciones teóricas que deben ser tomadas en cuenta para la generación del enlace como muestra la tabla 10 del ANEXO B. La implementación del primer modelo de recepción iniciará por crear el VI principal en el que se integran los sub-VIs que forman parte del sistema de recepción para la adquisición de la señal disponible en el canal; se empleará la misma frecuencia de trabajo que el transmisor de 2,2 GHz junto con los demás parámetros ya establecidos y que vendrán detallados en el ANEXO D. Las gráficas resultantes de la transmisión se podrán analizar al momento de simular los VIs requeridos por el enlace de video y que serán respaldados en todo el proceso de transmisión por cuadros de errores que se mostrarán en el panel frontal.

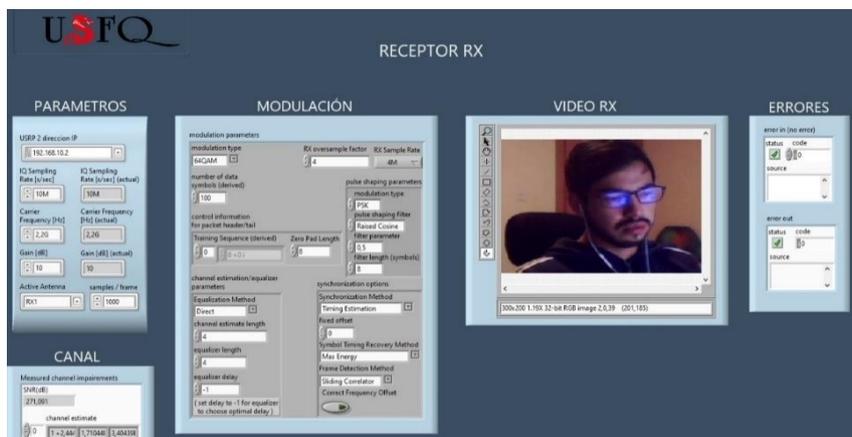


Figura 17: Panel frontal del receptor en LabVIEW-Modelo 1

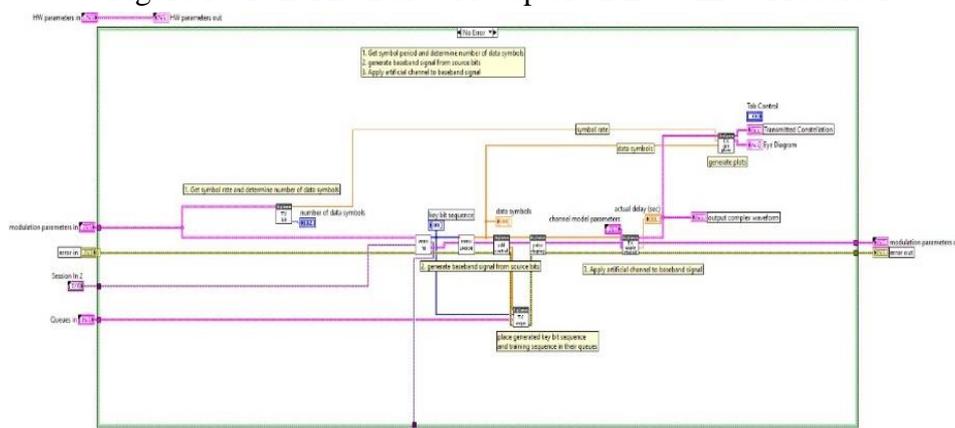


Figura 18: Diagrama de bloques del VI receptor-Modelo 1

Diseño del simulador.

El simulador será el VI que ejecutará tanto el transmisor como el receptor y permitirá tener el control de los principales parámetros del enlace de video junto a las gráficas propias de sistemas de comunicaciones resultantes de la recepción de los datos y que se pueden evaluar en el panel frontal como se muestra a continuación.

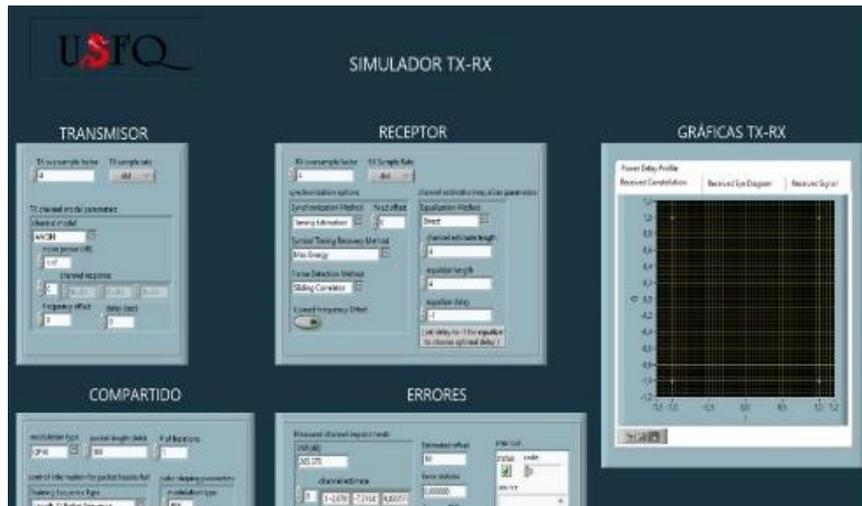


Figura 19: Panel frontal del simulador en LabVIEW-Modelo 1

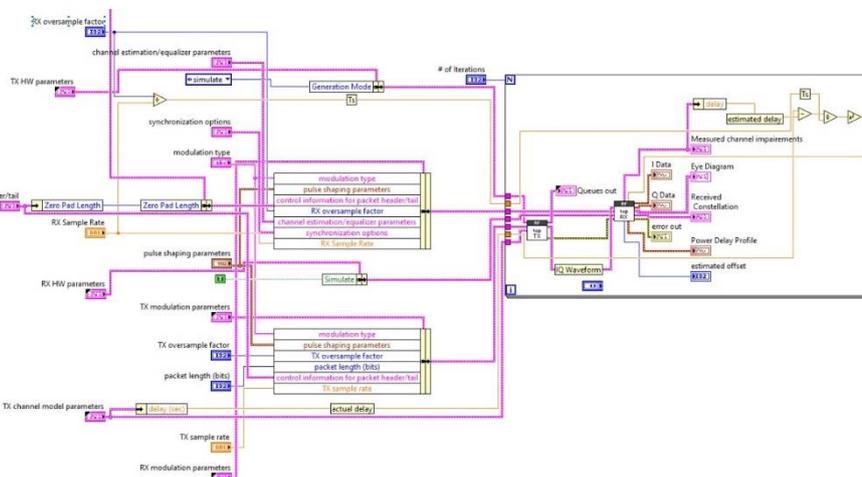


Figura 20: Diagrama de bloques del VI simulador-Modelo 1

Transmisión de video-Modelo 2.

Este segundo modelo de enlace de transmisión de video se emplea principalmente para observar el ancho de banda en el VI receptor, el cual contiene la señal recuperada del canal emitida por el transmisor en la que se busca evaluar en

tiempo real el comportamiento de la gráfica del espectro de ancho de banda a parte de las gráficas que ya nos muestra el modelo 1.

Diseño del Transmisor TX.

Para el transmisor del modelo 2 se realiza los cambio pertinentes en la programación del desarrollador LabVIEW para llevar a cabo lo antes mencionado y se detallará en el ANEXO E.



Figura 21: Panel frontal del VI transmisor en LabVIEW-Modelo 2

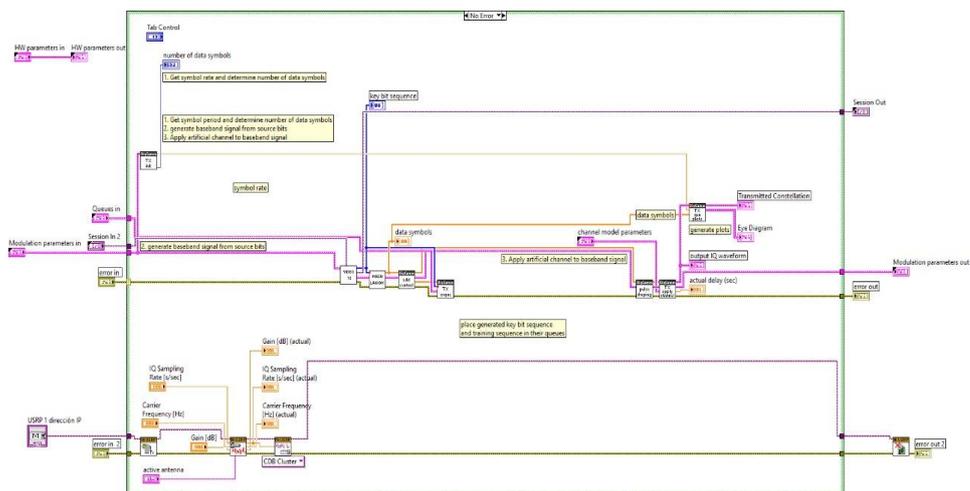


Figura 22: Diagrama de bloques del VI transmisor-Modelo 2

Diseño del Receptor RX.

La programación de bloques del receptor tiene notorias diferencias al modelo 1, puesto que se aplica un gráfico de espectro de ancho de banda justo a la salida de la señal receptada en la portadora con la finalidad de evaluar la calidad de la señal y comprobar la frecuencia de trabajo, considerando las pérdidas que ocurren dentro de la transmisión de video.

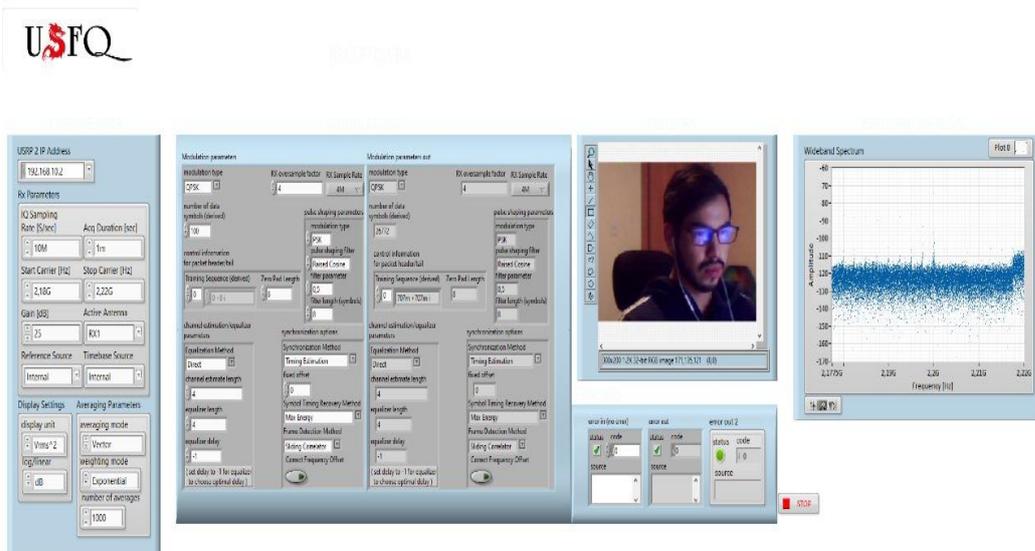


Figura 23:Panel frontal del receptor en LabVIEW-Modelo 2

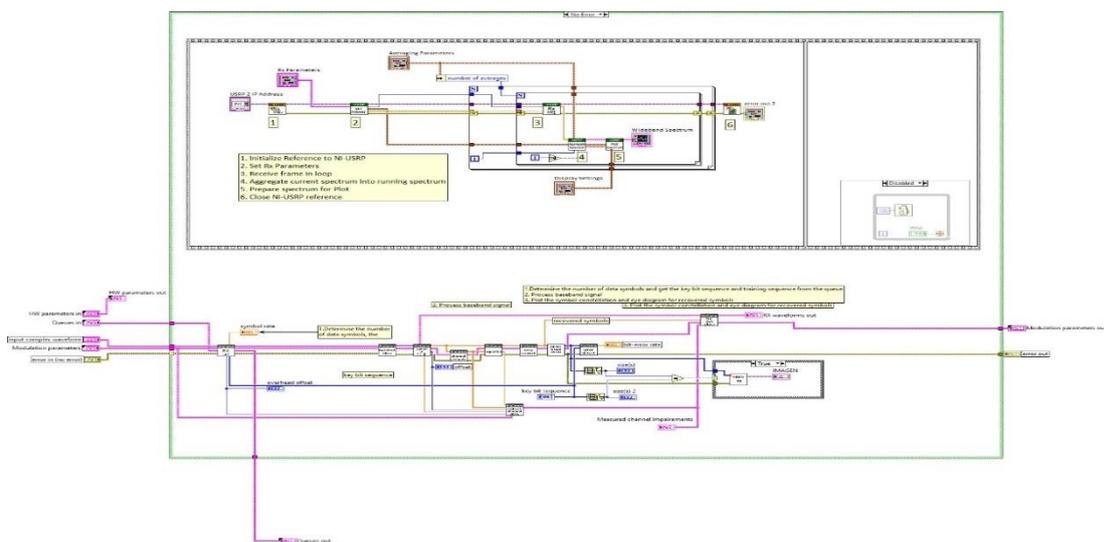


Figura 24: Diagrama de bloques del VI receptor-Modelo 2

Diseño del simulador.

El simulador para este modelo 2, contendrá los mismos parámetros de configuración del modelo 1 puesto que las gráficas que son de interés permanecen para su análisis respectivo.

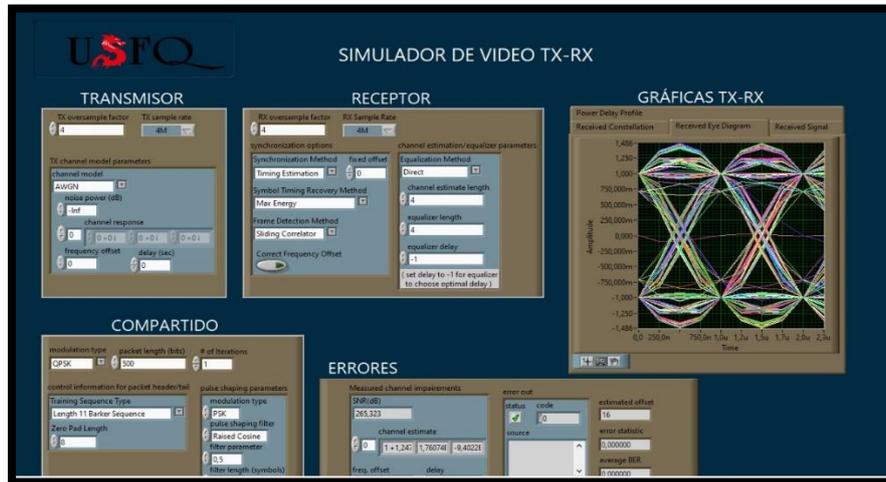


Figura 25: Panel frontal del simulador en LabVIEW-Modelo 2

Resultados de transmisión de video

Prueba subjetiva de transmisión de video.

Los resultados obtenidos en el enlace de transmisión de video vienen derivados de los dos modelos, cada uno con sus propiedades de diseño que se ha establecido. Los resultados que se muestran a continuación pertenecen a pruebas con parámetros en el que el sistema de transmisión permanece estable y eficiente.



Figura 26: Conexión física de los dispositivos TX-RX con el PC

Modelo 1.

Tabla 4: Resultados de transmisión de video en modulación QPSK sin AWGN

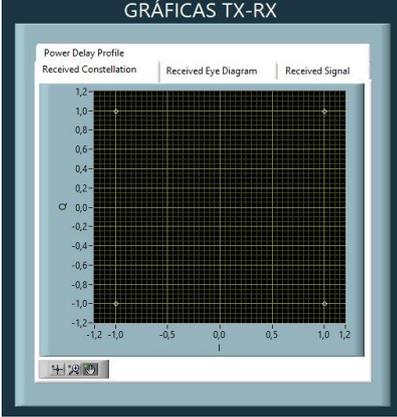
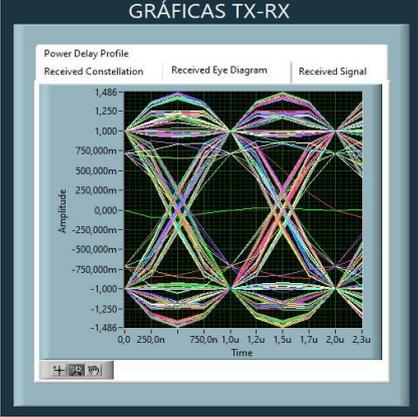
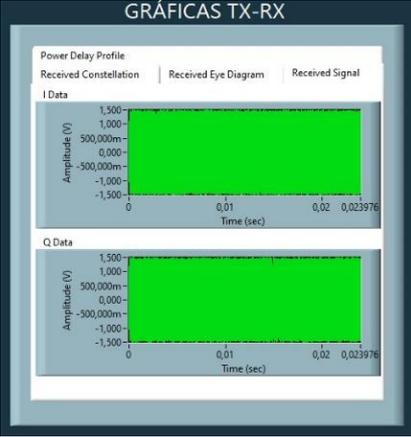
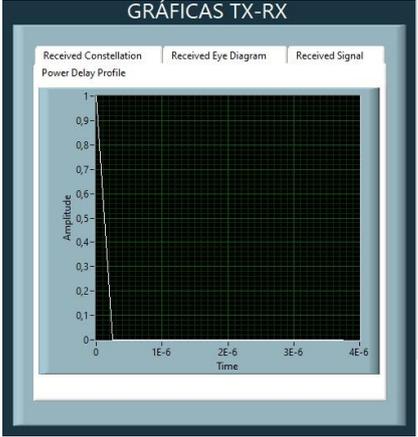
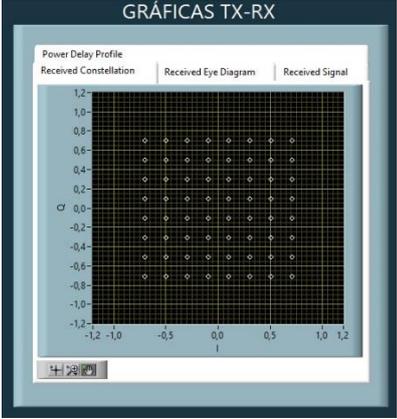
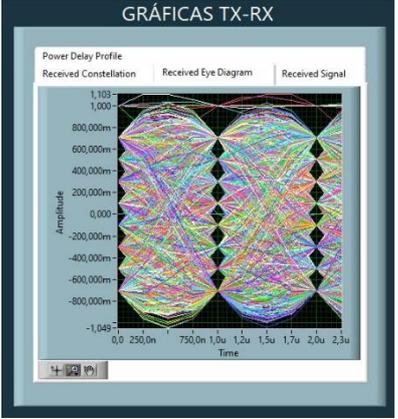
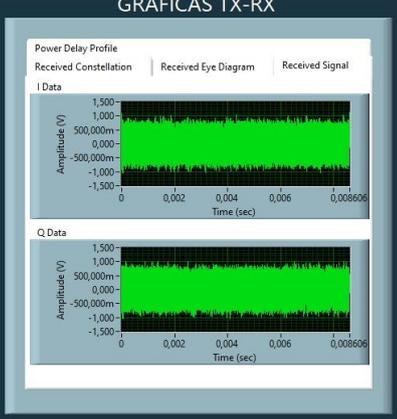
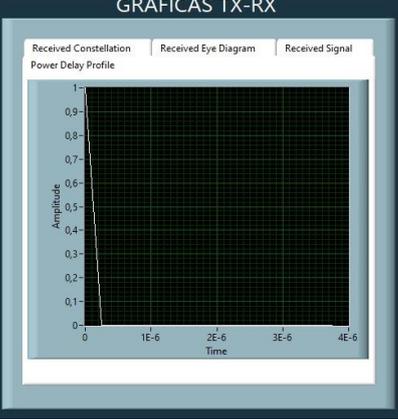
<p style="text-align: center;">Diagrama de constelación</p>  <p>Representación de constelación de 4 símbolos con 2 bits por cada símbolo en el plano I/Q característicos de la modulación QPSK, denota simetría entre cada símbolo y cumple con la diferencia de 180° entre señales.</p>	<p style="text-align: center;">Diagrama de ojo</p>  <p>El diagrama de ojo muestra eficiencia en la transmisión puesto que comprueba una transmisión sin interferencias ni ruido en su diagrama. La abertura vertical del ojo es bastante abierta descartando alguna interferencia entre símbolos.</p>
<p style="text-align: center;">Señal Recibida I/Q</p>  <p>Se observa la señal recibida en los planos de fase y cuadratura como efecto de la correcta transmisión.</p>	<p style="text-align: center;">Perfil de retardo de potencia</p>  <p>El perfil de retardo de potencia denota un promedio temporal muy pequeño, sin verse afectada la transmisión.</p>

Tabla 5: Resultados de transmisión de video en modulación 64-QAM sin AWGN

Diagrama de constelación	Diagrama de ojo
 <p>Representación gráfica del diagrama constelación de 64 símbolos bastante simétricos entre sí, con 6 bits por cada símbolo en el plano I/Q, característicos de la modulación 64-QAM.</p>	 <p>El diagrama de ojo muestra eficiencia en la transmisión puesto que comprueba una transmisión sin interferencias ni ruido en su diagrama. La abertura vertical del ojo es bastante abierta descartando alguna interferencia entre símbolos y considerando que se identifican 8 diagramas de ojo superpuestos.</p>
Señal Recibida I/Q	Perfil de retardo de potencia
 <p>Se identifica la señal recibida en los planos de fase y cuadratura como efecto de la correcta transmisión.</p>	 <p>El perfil de retardo de potencia denota un promedio temporal muy pequeño, sin verse afectada la transmisión.</p>

Resultados de transmisión de video del modelo 1 implementado, con un ruido inducido de -40 dB del tipo AWGN:

Tabla 6: Resultados de transmisión de video en modulación QPSK con -40 dB de AWGN

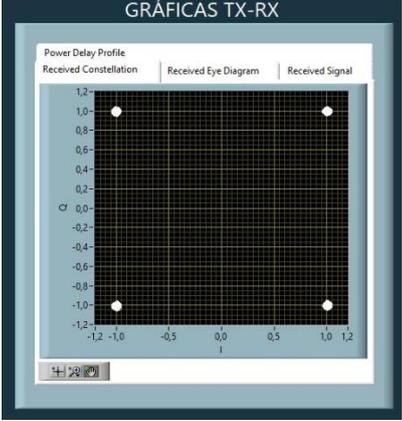
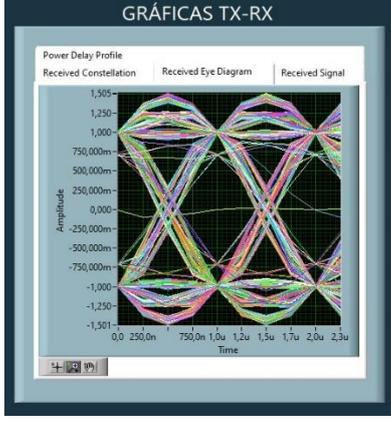
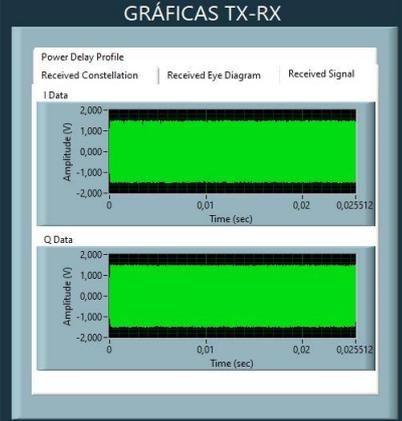
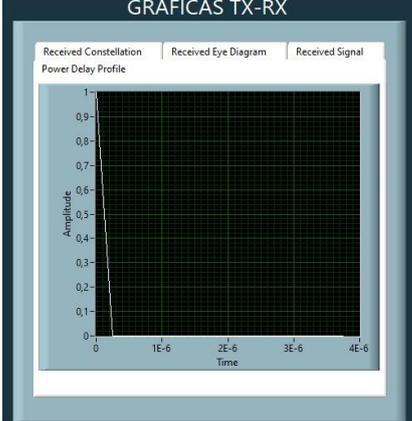
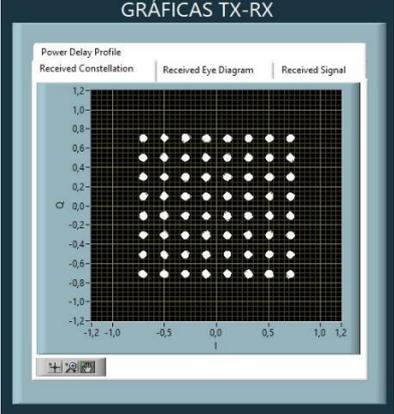
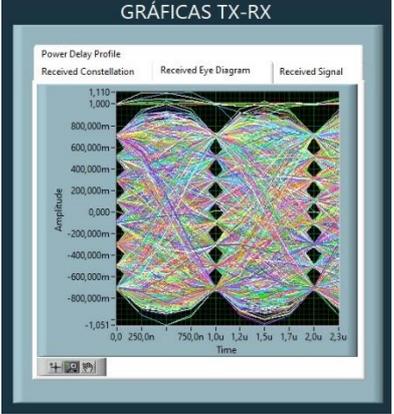
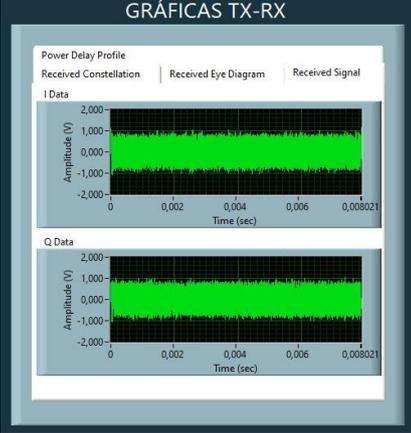
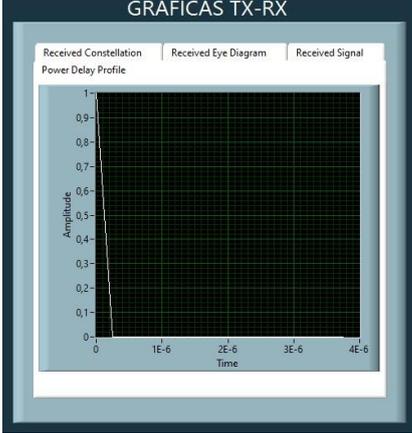
Diagrama de constelación	Diagrama de ojo
 <p>Representación de constelación de 4 símbolos en el plano I/Q, con 2 bits por cada símbolo que es característica de la modulación QPSK con la presencia de ruido del tipo AWGN de -40 dB. La presencia de ruido es completamente notorio puesto que el ruido se agrupa en cada símbolo y permite observar 4 símbolos más grandes.</p>	 <p>Pese al ruido inducido de -40 dB, el diagrama de ojo muestra eficiencia en la transmisión puesto que no presenta señales de interferencia en la amplitud del diagrama de ojo. En presencia de ruido del tipo AWGN existen más superposiciones.</p>
Señal Recibida I/Q	Perfil de retardo de potencia
 <p>La recepción de señal se reduce parcialmente en presencia de un ruido que no interviene por completo en la transmisión y que, comparada con la señal recibida sin ruido, no es significativamente relevante.</p>	 <p>El perfil de retardo de potencia denota un promedio temporal muy pequeño en existencia de ruido de -40 dB, logrando que no sea tan significativo para la transmisión en general.</p>

Tabla 7: Resultados de transmisión de video en modulación 64-QAM con -40 dB de AWGN

Diagrama de constelación	Diagrama de ojo
 <p>Representación de constelación de 64 símbolos, 6 bits por cada símbolo en el plano I/Q que es característico de la modulación 64-QAM con la presencia de ruido del tipo AWGN de -40 dB. La presencia de ruido es completamente notorio puesto que el ruido se agrupa en cada símbolo y permite observar 64 símbolos más grandes.</p>	 <p>El diagrama de ojo muestra eficiencia en la transmisión puesto que comprueba una transmisión sin interferencias ni ruido en su diagrama con gran amplitud verticalmente. Las superposiciones se pueden notar más puesto que existen 8 diagramas de ojo que provoca mayor sobreposición en presencia de ruido del tipo AWGN.</p>
Señal Recibida I/Q	Perfil de retardo de potencia
 <p>La recepción de señal se reduce parcialmente en presencia de un ruido que no interviene por completo en la transmisión y que, comparada con la señal recibida sin ruido, no es significativamente relevante.</p>	 <p>El perfil de retardo de potencia denota un promedio temporal muy pequeño en existencia de ruido de -40 dB, logrando que no sea tan significativo para la transmisión en general.</p>

Modelo 2.

El modelo 2 de transmisión de video, presenta como resultado el grafico de espectro de la señal que está siendo recibida por parte del transmisor a través del canal pero que no denota con claridad el ancho de banda a la que se está realizando la transmisión de video. Sin embargo, se observa en el recuadro azul de la figura 28, que efectivamente en la frecuencia de 2,2 GHz existe un cambio repentino de la señal recibida pero difícilmente se logra observar los rangos de la frecuencia superior e inferior de la frecuencia de operación para poder calcularlo y comprobar que si se está transmitiendo a la frecuencia con la que han sido parametrizados los VIs de transmisión y recepción.

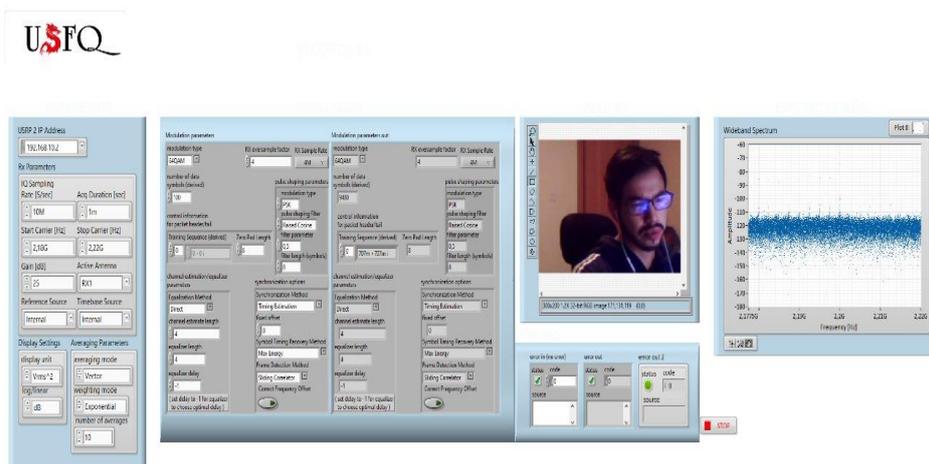


Figura 27: Panel frontal del receptor-Modelo 2

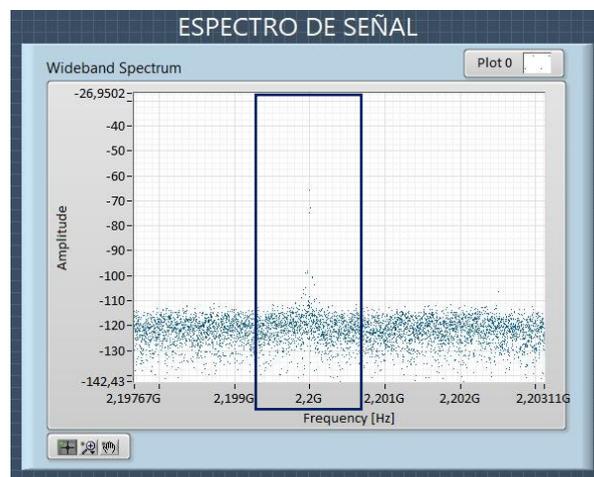


Figura 28: Espectro de señal recibida-Modelo 2

Evaluación de la calidad del enlace.

Para evaluar la calidad del enlace de transmisión de video, es pertinente ejecutar el sistema de transmisión y recepción con distintos valores de SNR hasta llevarlos a un nivel adecuado de distorsión en cada tipo de modulación.

Se realizará una comparativa en base a los valores que se han establecido como recomendados frente a los nuevos valores en los que las gráficas propias de sistemas de comunicación muestran un comportamiento diferente y que pueden afectar la transmisión en cada una de las etapas de comunicación. Dicha evaluación se muestra en el ANEXO G al final del documento.

Futuras Implementaciones

Explorar tipos de modulaciones de señal digital, aparte de las establecidas en este proyecto con la finalidad de encontrar un tipo de modulación más eficiente y que permita mayor fluidez en la transmisión de fotogramas por segundo, teniendo en cuenta todas las consideraciones de latencia presentes en sistemas de comunicación inalámbrica.

Desarrollar nuevas funciones de procesamiento de señales a partir de código y funciones textuales que el módulo *MathScript* de LabVIEW permite ejecutar dentro de la programación de bloques en la utilización de hardware de NI en tiempo real con la finalidad de complementar el análisis al procesamiento de señal dado en este proyecto

Implementar un enlace de transmisión de audio a través de dos NI USRP-2920 con la finalidad de complementar a la transmisión de video en tiempo real ya existente y así poder obtener una videoconferencia como las plataformas existentes en la actualidad.

CONCLUSIONES

Se ha implementado con éxito un enlace de transmisión de video empleando dispositivos de Radio Definidos por Software NI USRP-2920 conforme a los objetivos propuestos, tras establecer un sistema de comunicación digital por medio de LabVIEW, desarrollador que ejecuta la programación de instrumentos virtuales tanto de la transmisión como de la recepción para llevar a cabo la comunicación entre USRPs utilizando esquemas típicos de modulación digital como son QPSK y 64QAM. Dicha transmisión es validada por medio de las técnicas utilizadas dentro del proceso de transmisión que se encuentran detalladas en el ANEXO D y ANEXO E, permitiendo tener resultados de eficiencia de transmisión y procesamiento dado a la señal.

La comprobación subjetiva del enlace se realizó monitoreando una transmisión de fotogramas adquiridos a través de una webcam y transmitidos usando el sistema implementado. Los parámetros de funcionamiento de los equipos en el enlace se ajustaron de forma que no se percibe degradación en los fotogramas transmitidos. Se trata de un sistema que contiene los fotogramas a ser transmitidos hasta que finalmente efectúa su transmisión. Sin embargo, la latencia introducida por el procesamiento es apreciable y en promedio es alrededor de 3 segundos.

No se utilizaron instrumentos de medición externos para la comprobación del enlace. Las mediciones se obtuvieron utilizando las propias capacidades de medición y de procesamiento de señal de los equipos utilizados, lo cual amplió las latencias en el tratamiento total asociado a la transmisión. Esto pudo comprobarse con la aplicación de dos modelos diferentes. En el segundo se añadió un monitor de espectro electromagnético, el cual requiere de un tiempo extenso para el procesamiento de la señal, resultando en el apareamiento de una latencia promedio de 5.68 segundos en el flujo de fotogramas recibidos.

El BER resultó despreciable dada la cercanía entre ambos equipos, así que se añadió artificialmente ruido blanco en el transmisor y evaluar los cambios en el sistema. A los tipos de modulación empleados se aplicó ruido del tipo AWGN de -40 dB, y -30 dB como muestran los resultados en el ANEXO F junto con los valores de SNR resultantes del ruido aplicado. Partiendo del teorema de Nyquist en el que se establece que la reconstrucción perfecta de una señal es posible siempre y cuando la frecuencia de muestreo es mayor que el doble de la frecuencia máxima de la señal que se muestreo; por ello, la frecuencia de muestreo parametrizada fue establecida en base a este fundamento con la finalidad de evitar el *aliasing* obteniendo una reconstrucción teóricamente perfecta.

Se incluyó dentro de los instrumentos de comprobación, incorporados dentro de la programación, un monitor de espectro electromagnético que se usó para evaluar la disponibilidad de espectro radioeléctrico. Es una técnica saludable en ingeniería de telecomunicaciones el monitorear el espectro previamente a la transmisión a través del enlace de comunicaciones. El espectro se mostró bastante ocupado, sin embargo, dada la cercanía entre transmisor y receptor, la señal transmitida se superpone localmente a las emisiones recibidas posibilitando su recepción exitosa.

Se espera que los resultados obtenidos en el presente proyecto faciliten el desarrollo de investigaciones e implementaciones futuras en esta misma línea de trabajo tanto a nivel de software como de hardware, que permitan comprender mejor la compleja relación entre las capacidades del hardware disponible, los métodos heurísticos de codificación de fuente y de codificación de canal y los escenarios pertinentes en busca de configuraciones óptimas que posibiliten una mayor eficiencia en la transmisión, y la aproximación al estado del arte de las comunicaciones digitales, un campo en permanente investigación y perfeccionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alawsh, Saleh A et al. "Range and Angle Measurements Based on Software Defined Radio Platform." *2019 IEEE 10th GCC Conference & Exhibition (GCC)*. IEEE, 2019. 1–5. Web.
- Arnedo Moreno, J. (2013). *Redes de comunicaciones*. Barcelona: Editorial UOC.
- Borisov, Sergey V, Daria A Lotareva, and Ilya D Chernobrovkin. "A Model of Office Digital Repeater of Audio Broadcasting." *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2019. 1152–1154. Web.
- Bress, T. (2013). *Effective LabVIEW Programming*. May 2013, 696.
<http://www.ntspress.com/publications/effective-labview-programming/>
- Ettus Research. (2021). Retrieved from <https://www.ettus.com/all-products/vert400/>
- Foundation, M., Labview, N. I., Vision, L., Module, A., Ni, L., Acquisition, V., Development, V., & Web, N. I. (2021). *Image Acquisition with LabVIEW*. 17–32.
- Janneth, I., & Vargas Asanza, A. (2016). *Implementacion Y Simulación De La Transmision De Audio En Un Sistema De Comunicacion Ofdm*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/37248/D-103494.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Moreno, L. E. (2014). *SATÉLITE EN ÓRBITA BAJA*.
- National Instruments. (2017). Recuperado el 25 de Febrero de 2021, de Sitio Web de National Instruments: <http://www.ni.com/en-us/shop/select/software-defined-radio-device>
- L.W. Couch, II, *Digital and Analog Communication Systems*, Prentice Hall, 2007
- Rosales, V., Isaac, F., Guijarro, M., & Michelle, A. (2017). *Diseño de un prototipo de pruebas de un radar monoestático utilizando radio definida por software*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14151/1/UPS-GT001828.pdf>
- Universitaria, C. (2006). *ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN ADAPTIVA Tesis que para obtener el título de Ingeniero en Telecomunicaciones Presentan : Ximena López Quiroz Christian Mora Martínez Director de Tesis : Dr . Víctor Rangel Licea*.
- Welch, T. B., & Shearman, S. (2012). Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, March*, 2789–2792.
<https://doi.org/10.1109/ICASSP.2012.6288496>
- Xiong, F. (2006). *Digital modulation techniques* (2nd ed.). Artech House.

ANEXO A: REPRESENTACIÓN DE BITS EN MODULACIÓN 64-QAM

Tabla 8: Representación de bits de modulación 64-QAM

Bit 1	Bit 2	Bit 3	Bit 4	Bit 5	Bit 6	I	Q
0	1	1	0	1	1	7	7
0	1	1	0	1	0	7	5
0	1	1	0	0	0	7	3
0	1	1	0	0	1	7	1
0	1	1	1	0	1	7	-1
0	1	1	1	0	0	7	-5
0	1	1	1	1	0	7	-5
0	1	1	1	1	1	7	-7
0	1	0	0	1	1	5	7
0	1	0	0	1	0	5	5
0	1	0	0	0	0	5	3
0	1	0	0	0	1	5	1
0	1	0	1	0	1	5	-1
0	1	0	1	0	0	5	-5
0	1	0	1	1	0	5	-5
0	1	0	1	1	1	3	-7
0	0	0	0	1	1	3	7
0	0	0	0	1	0	3	5
0	0	0	0	0	0	3	3
0	0	0	0	0	1	3	1
0	0	0	1	0	1	3	-1
0	0	0	1	0	0	3	-5
0	0	0	1	1	0	3	-5
0	0	0	1	1	1	3	-7
0	0	1	0	1	1	1	7
0	0	1	0	1	0	1	5
0	0	1	0	0	0	1	3
0	0	1	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1	-1
0	0	1	1	0	0	1	-5
0	0	1	1	1	0	1	-5
0	0	1	1	1	1	1	-7
1	1	1	0	1	1	-1	7
1	1	1	0	1	0	-1	5
1	1	1	0	0	0	-1	3
1	1	1	0	0	1	-1	1
1	1	1	1	0	1	-1	-1
1	1	1	1	0	0	-1	-5
1	1	1	1	1	0	-1	-5
1	1	1	1	1	1	-3	-7
1	1	0	0	1	1	-3	7

1	1	0	0	1	0	-3	5
1	1	0	0	0	0	-3	3
1	1	0	0	0	1	-3	1
1	1	0	1	0	1	-3	-1
1	1	0	1	0	0	-3	-5
1	1	0	1	1	0	-3	-5
1	1	0	1	1	1	-3	-7
1	1	0	0	1	1	-5	7
1	1	0	0	1	0	-5	5
1	1	0	0	0	0	-5	3
1	1	0	0	0	1	-5	1
1	1	0	1	0	1	-5	-1
1	1	0	1	0	0	-5	-5
1	1	0	1	1	0	-5	-5
1	1	0	1	1	1	-5	-7
1	1	1	0	1	1	-7	7
1	1	1	0	1	0	-7	5
1	1	1	0	0	0	-7	3
1	1	1	0	0	1	-7	1
1	1	1	1	0	1	-7	-1
1	1	1	1	0	0	-7	-5
1	1	1	1	1	0	-7	-5
1	1	1	1	1	1	-7	-7

ANEXO B: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN

Tabla 9: Parámetros de operación del transmisor.

Parámetro	Rango
Rango de frecuencias	50 MHz – 2.2 GHz
Paso de frecuencias	< 1 kHz
Precisión de frecuencia	2.5 ppm
Rango de ganancia	0 dB – 31 dB
Paso de ganancia	1 dB
Potencia máxima a la entrada (P_{out})	
-50 MHz-1.2 GHz	50 mW-100 mW (17 dBm-20 dBm)
-1.2 GHz-2.2 GHz	30 mW-70 mW (15 dBm-18 dBm)
Ancho de banda máximo instantáneo	
-16 bits ancho de muestra	25 MHz
-8 bits ancho de muestra	40 MHz
Velocidad máxima de muestreo I/Q	
-16 bits ancho de muestra	25MS/s
-8 bits ancho de muestra	50 MS/s
DAC	2 canales, 16 bits, 400 MS/s
DAC SFDR	80 dB

Tabla 10: Parámetros de operación del receptor

Parámetro	Rango
Rango de frecuencias	50 MHz – 2.2 GHz
Paso de frecuencias	< 1 kHz
Figura de ruido	5 dB-7 dB
Rango de ganancia	0 dB – 31.5 dB
Paso de ganancia	0.5 dB
Potencia máxima a la entrada (P_{in})	0 dBm
Precision de frecuencia	2.5 ppm
Velocidad máxima de muestreo I/Q	
-16 bits ancho de muestra	25MS/s
-8 bits ancho de muestra	50 MS/s
Ancho de banda máximo instantáneo	
-16 bits ancho de muestra	20 MHz
-8 bits ancho de muestra	40MHz
DAC SFDR	80 dB
DAC	2 canales, 16 bits, 400MS/s

ANEXO C: OPERADOR DE COLAS DE LABVIEW

Tabla 11: Operador de colas de LabVIEW

Módulo QUEUE	Descripción
 Obtain Queue	Obtain queue: este módulo crea una referencia de una nueva cola.
 Enqueue Ele...	Enqueue Element: esta módulo se encarga de colocar un elemento en la parte posterior de una cola.
 Enqueue Ele...	Enqueue Element At Opposite End: este módulo coloca un ítem en la parte delantera de una cola.
 Dequeue Ele...	Dequeue Element: este módulo remueve los elementos de la parte delantera de la cola y lo devuelve.
 Release Queue	Release Queue: este módulo se encarga de liberar la referencia de la cola

ANEXO D: PROCESO DE TRANSMISIÓN DE VIDEO DEL MODELO 1

VI Transmisor

Generación de video: por medio de las librerías propias de adquisición de imagen denominadas como NI-IMAQ se procede a convertir la información de cada fotograma generado en string de dígitos binarios.

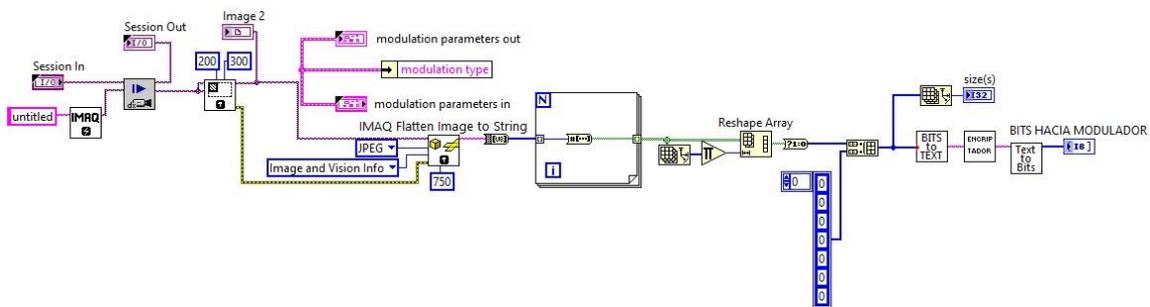


Figura 29: Generación de video-Modelo 1

Inicialización: se preparan los paquetes de bits con la parametrización asignada al transmisor que consta de frecuencia de trabajo, número de muestras, ganancia y el inicio de sesión del USRP 1 con la asignación correcta de antena TX/RX.

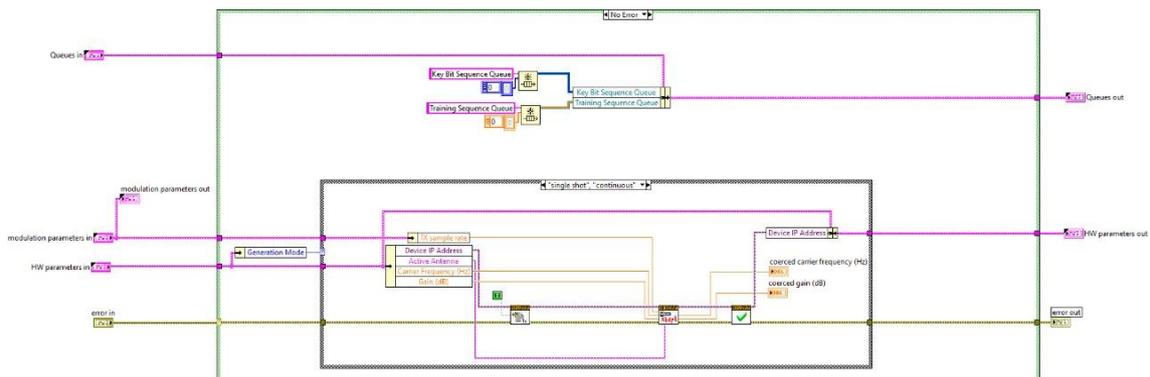


Figura 30: Inicialización de transmisión-Modelo 1

Codificación de paquetes: según el tamaño del paquete de bits que se haya establecido en los parámetros, inicia el proceso de codificación a través de un entrenamiento de secuencia del tipo *Barker sequence*, el cual realiza una secuencia finita de valores

digital con la propiedad de autocorrelación ideal acompañada por el operador de colas Queue que se especificó en el anexo anterior.

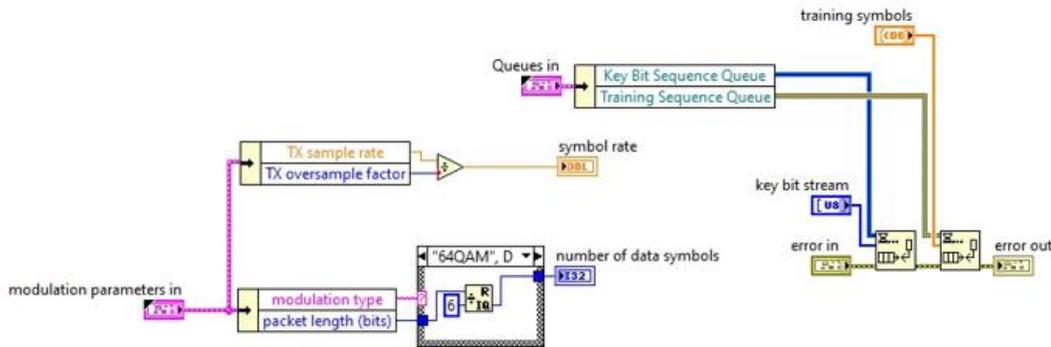


Figura 31: Codificación de paquetes-Modelo 1

Modulación QPSK/64-QAM: según el tipo de modulación que se quiera aplicar a la transmisión ya sea del tipo QPSK o del tipo 64-QAM, se crea la matriz de parte real e imaginaria dependiendo del número de bits que se requieren por símbolo; 2 bits para QPSK o 6 bits por símbolo para 64-QAM.

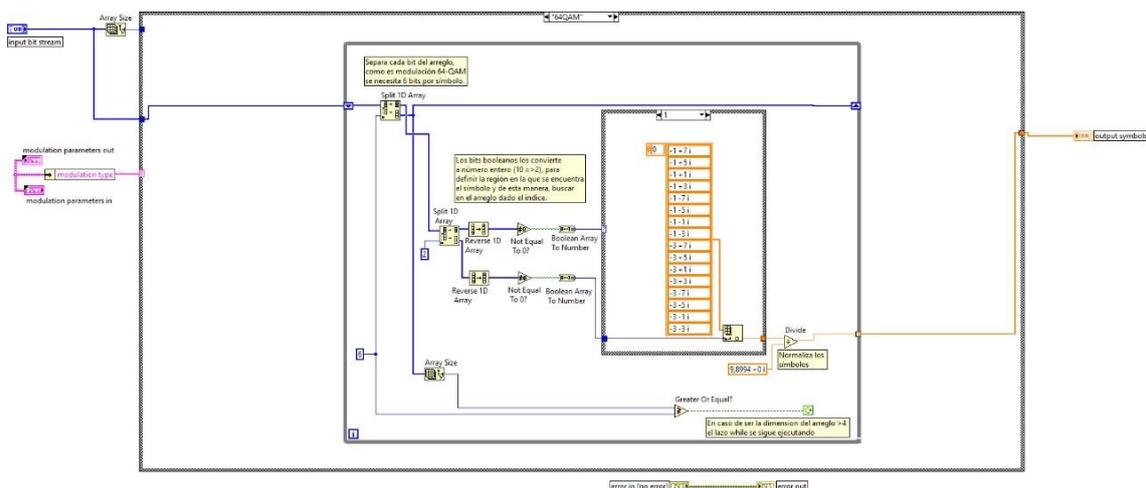


Figura 32: Modulación QPSK/64-QAM-Modelo 1

Preparación de datos para transmitir: se preparan los datos I/Q en orden de ejecución para ser transmitidos por medio del USRP transmisor, el cual está listo con la sesión iniciada para transmitir la información sobre el canal.

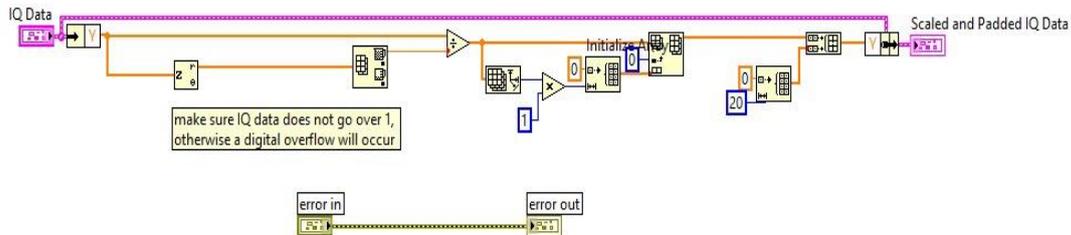


Figura 33: Preparación de datos I/Q-Modelo 1

Transmisión de datos: los paquetes de información son enviados de forma continua sobre el canal para que la antena receptora los pueda captar y se procese la información enviada a través de las tarjetas madre e hija dentro del USRP 2.

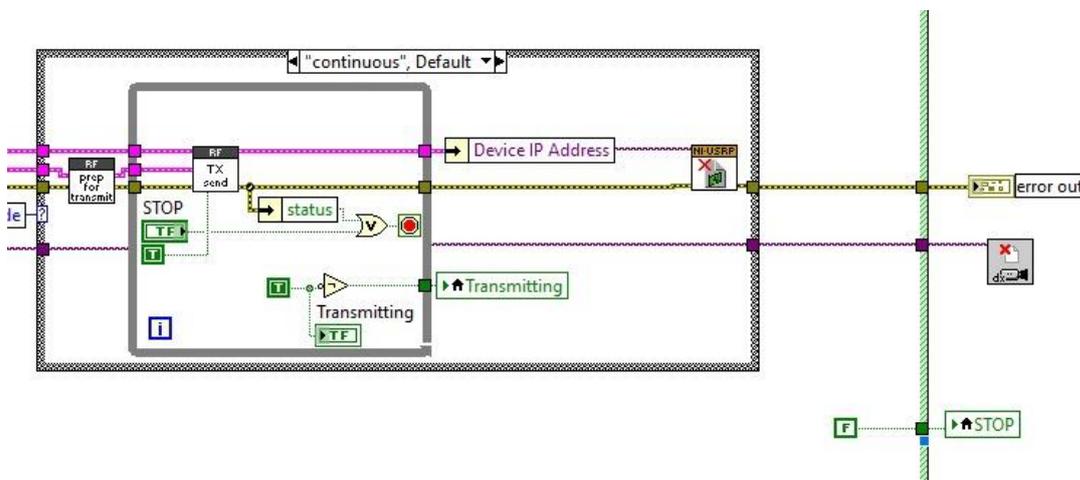


Figura 34: Transmisión de datos-Modelo 1

Graficas de transmisión de datos: como señal de que le señal ha sido transmitida con éxito, se muestra en el panel frontal las gráficas resultantes de la transmisión en la que se puede comprobar cómo se encuentra la transmisión en diagrama de constelación y diagrama de ojo.

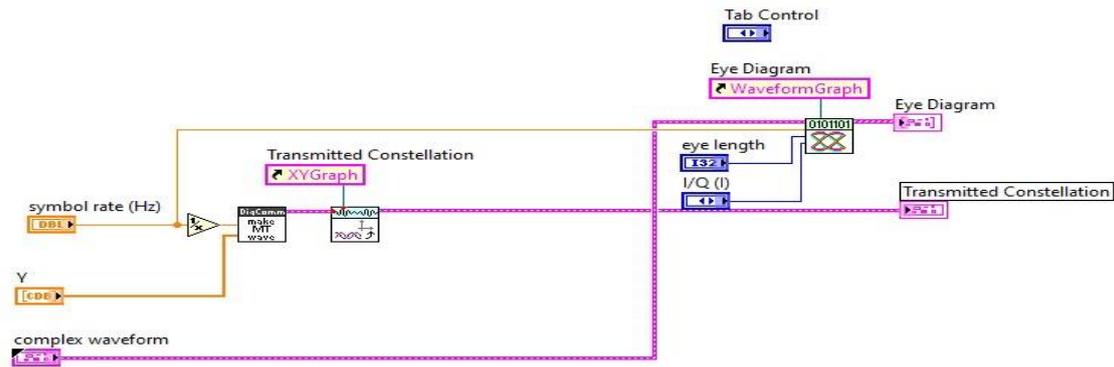


Figura 35: Diagramas propios de la transmisión-Modelo 1

VI Receptor

Recepción de datos: el tiempo establecido a los operadores de colas para la recepción de los datos, se identifican los símbolos recibidos según la modulación a la que fueron enviados y los prepara para demodular ya sea en QPSK o 64-QAM.

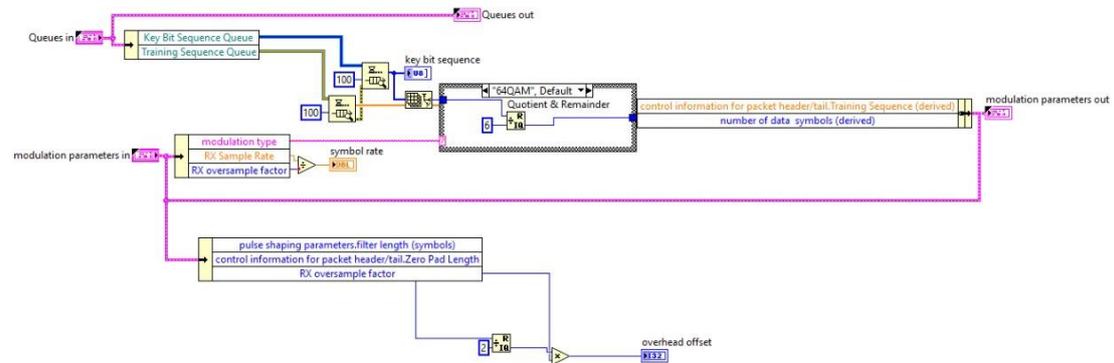


Figura 36: Recepción de datos-Modelo 1

Demodulación QPSK/64-QAM: los datos recibidos en forma de símbolos de bits son demodulados según el tipo de modulación que fue aplicado en la transmisión para consecuentemente proceder a la decodificación.

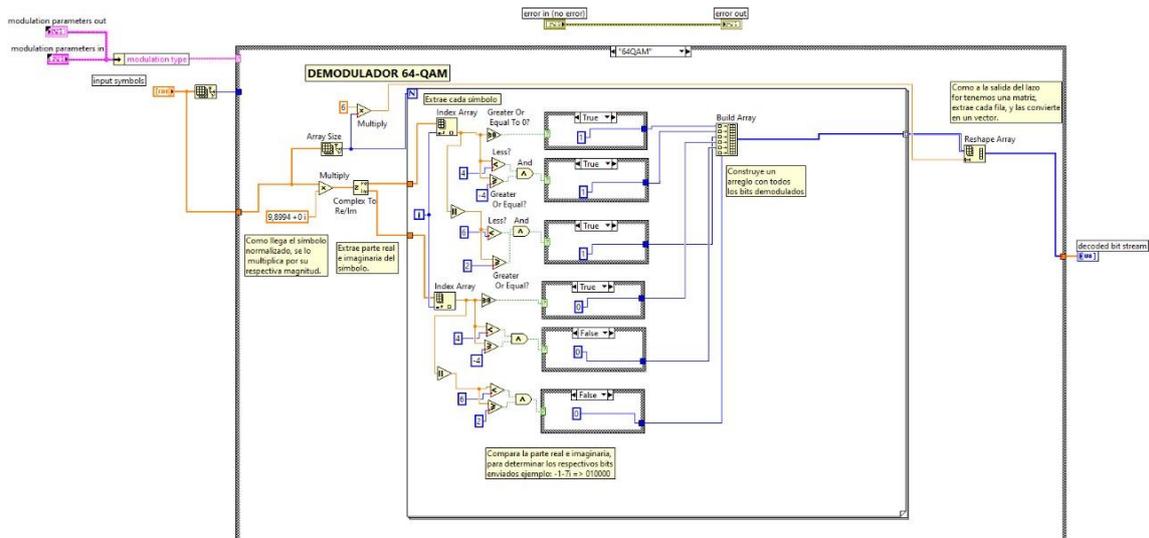


Figura 37: Demodulador QPSK/64-QAM-Modelo 1

Decodificador de paquetes: una vez que el paquete es detectado, se decodifica y se prepara para tener las gráficas de transmisión que comprueban la eficiencia o deficiencia de la señal recibida.

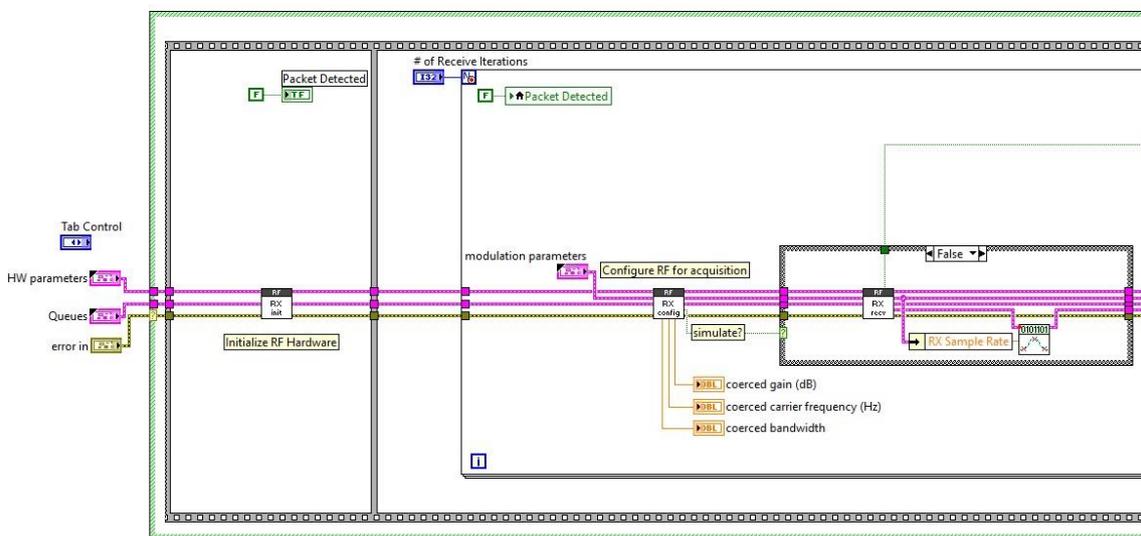


Figura 38: Decodificador de paquetes-Modelo 1

Gráficas de recepción de datos: se receipta el diagrama de constelación y el diagrama de ojo que fue transmitido para evidenciar las diferencias que disponen entre sí como

producto del proceso de transmisión y que permitan medir la tasa de error por bit (BER) de la transmisión de video.

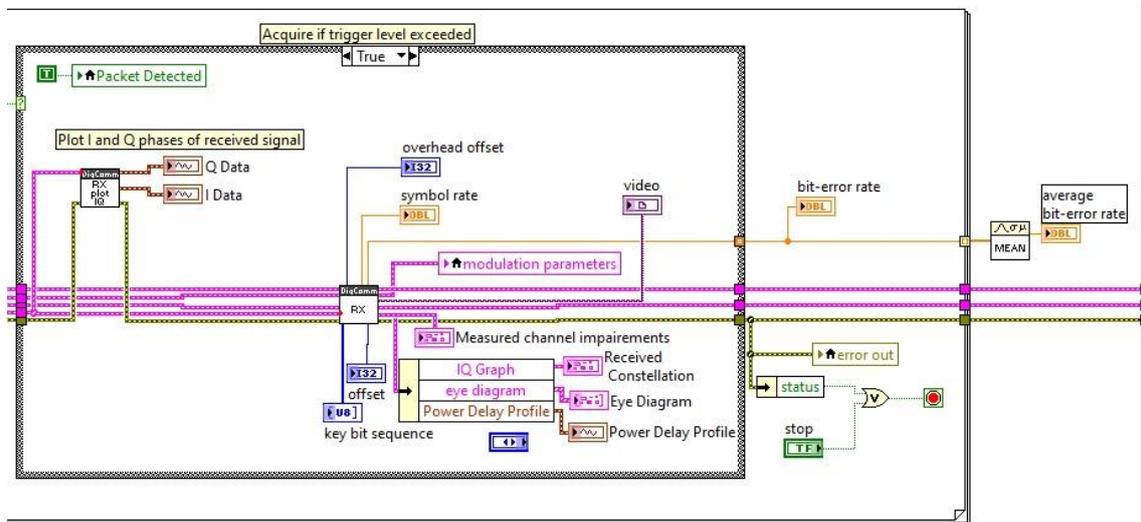


Figura 39: Diagramas propios de la recepción-Modelo 1

Recuperación de video digital: recupera los datos ya codificados y los transforma nuevamente en video que va a ser mostrado en el panel principal del VI receptor con cierta latencia como producto de la ejecución de todo el proceso de transmisión en tiempo real.

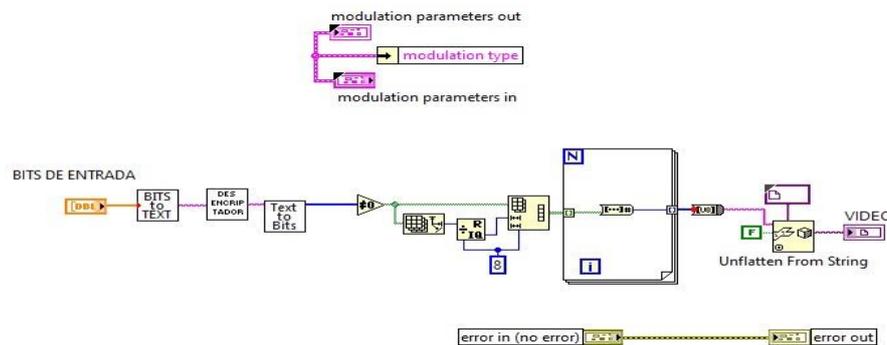


Figura 40: Recepción de video digital-Modelo 1

VI Simulador

El simulador convierte los Vis principales del transmisor y el receptor en sub-VIs y los ejecuta simultáneamente para mostrar los resultados finales producto de la transmisión de video, acompañado de un cuadro de errores que monitorea toda la transmisión y en caso de falla, arroja un mensaje específico del error. Los errores son fundamentales y por ello se calcula el error estadístico y el BER para evaluar numéricamente la ineficiencia del sistema.

Procesamiento simultaneo de TX y RX: se ejecuta simultáneamente el transmisor y el receptor, convirtiéndolos en sub-VIs del VI principal de simulación para adquirir graficas resultantes de toda la transmisión de video.

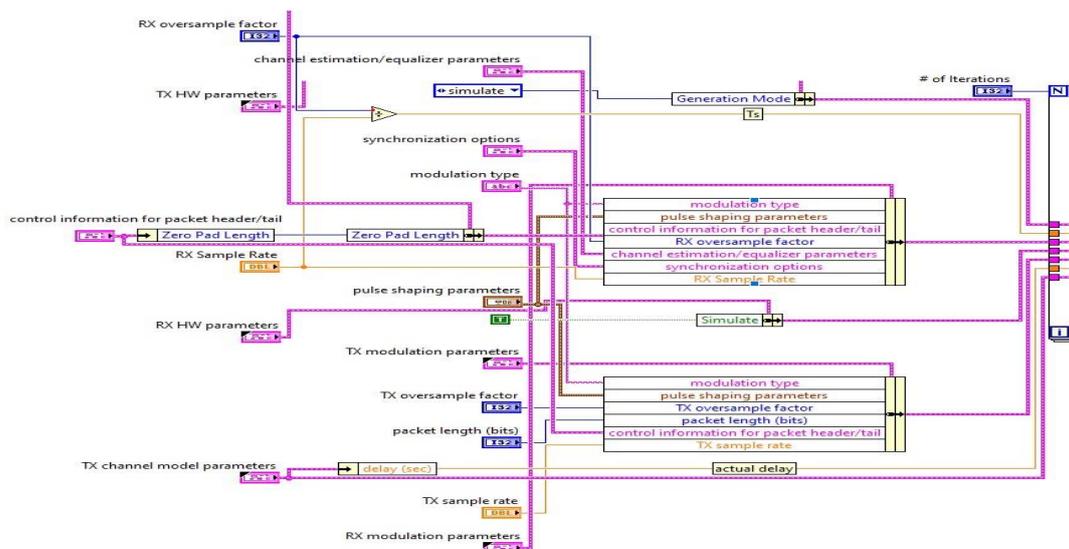


Figura 41: Ejecución simultanea de TX y RX para la simulación-Modelo 1

Diagramas resultantes de la transmisión de video: en la salida de toda la transmisión se presentan diagramas de constelación, diagramas de ojo, diagrama de señal recibida y retardo de potencia con la finalidad de evaluar cada ciclo de transmisión junto con los errores promediados de BER presentes en el enlace.

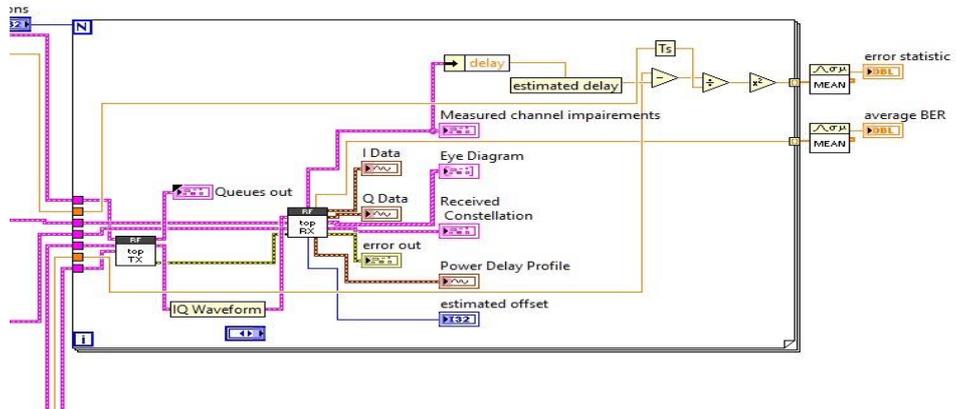


Figura 42: Diagramas resultantes de la transmisión de TX y RX- Modelo 1

ANEXO E: PROCESO DE TRANSMISIÓN DE VIDEO DEL MODELO 2

VI Transmisor

Generación de video: de acuerdo con la jerarquía de adquisición de imagen de las librerías denominadas como NI-IMAQ, se procede a convertir la información de cada fotograma capturado en string de dígitos binarios.

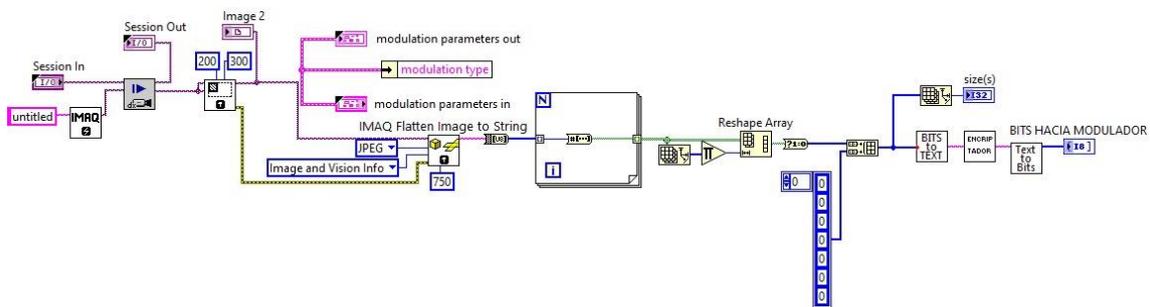


Figura 43: Generación de video-Modelo 2

Inicialización: se preparan los paquetes de bits con la parametrización asignada al transmisor que consta de frecuencia de trabajo, número de muestras, ganancia y el inicio de sesión del USRP 1 con la asignación correcta de antena TX/RX.

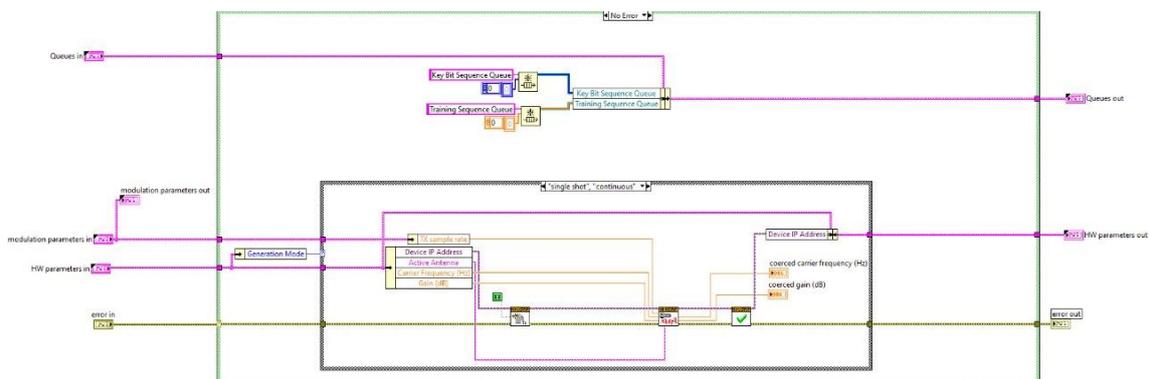


Figura 44: Inicialización de transmisión-Modelo 2

Codificación de paquetes: según el tamaño del paquete de bits que se haya establecido en los parámetros, inicia el proceso de codificación a través de un entrenamiento de

secuencia del tipo *Barker sequence*, el cual realiza una secuencia finita de valores digital con la propiedad de autocorrelación ideal acompañada por el operador de colas Queue que se especificó en el anexo anterior.

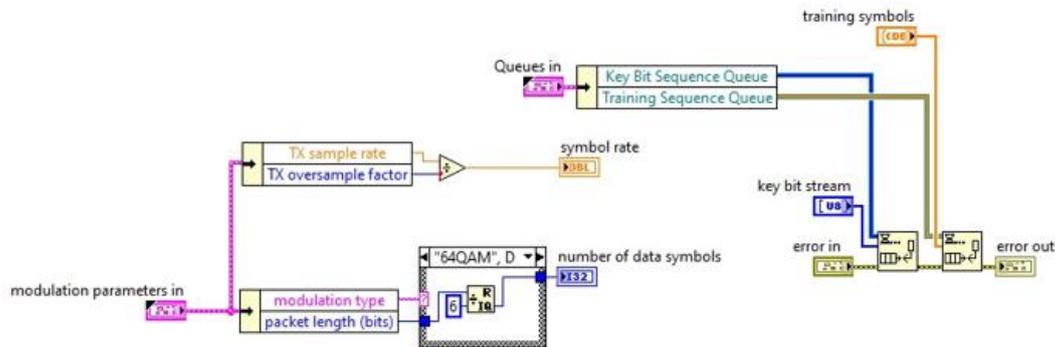


Figura 45: Codificación de paquetes-Modelo 2

Modulación QPSK/64-QAM: según el tipo de modulación que se quiera aplicar a la transmisión ya sea del tipo QPSK o del tipo 64-QAM, se crea la matriz de parte real e imaginaria dependiendo del número de bits que se requieren por símbolo; 2 bits para QPSK o 6 bits por símbolo para 64-QAM.

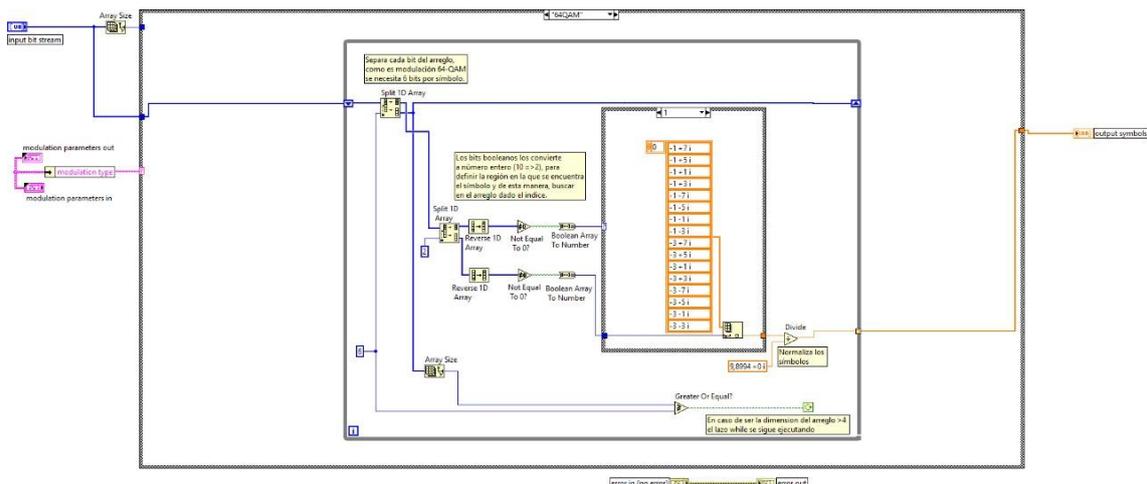


Figura 46: Modulación QPSK/64-QAM-Modelo 2

Preparación de datos para transmitir: se preparan los datos I/Q en orden de ejecución para ser transmitidos por medio del USRP transmisor, el cual está listo con la sesión iniciada para transmitir la información sobre el canal.

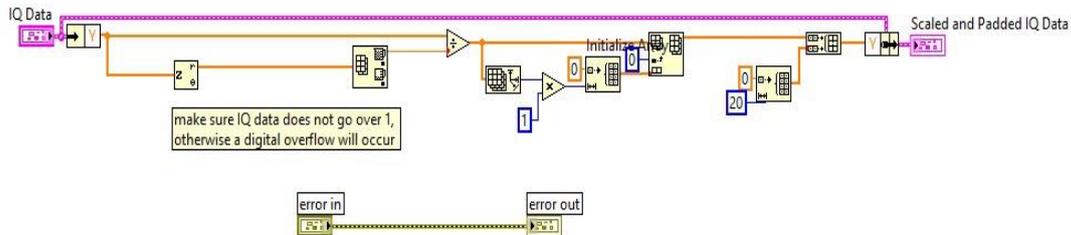


Figura 47: Preparación de datos I/Q-Modelo 2

Transmisión de datos: los paquetes de información son enviados de forma continua sobre el canal para que la antena receptora los pueda captar y se procese la información enviada a través de las tarjetas madre e hija dentro del USRP 2.

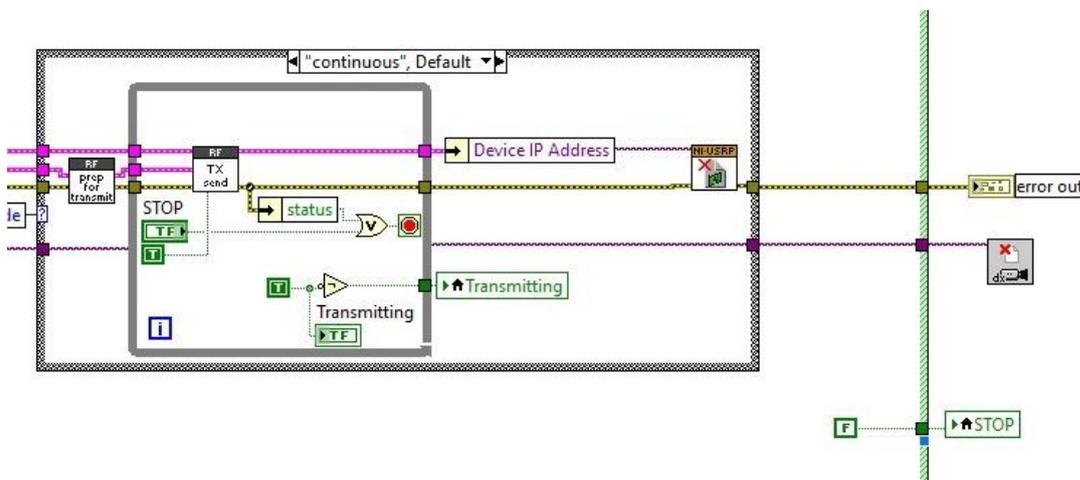


Figura 48: Transmisión de datos-Modelo 2

Graficas de transmisión de datos: como señal de que le señal ha sido transmitida con éxito, se muestra en el panel frontal las gráficas resultantes de la transmisión en la que se puede comprobar cómo se encuentra la transmisión en diagrama de constelación y diagrama de ojo.

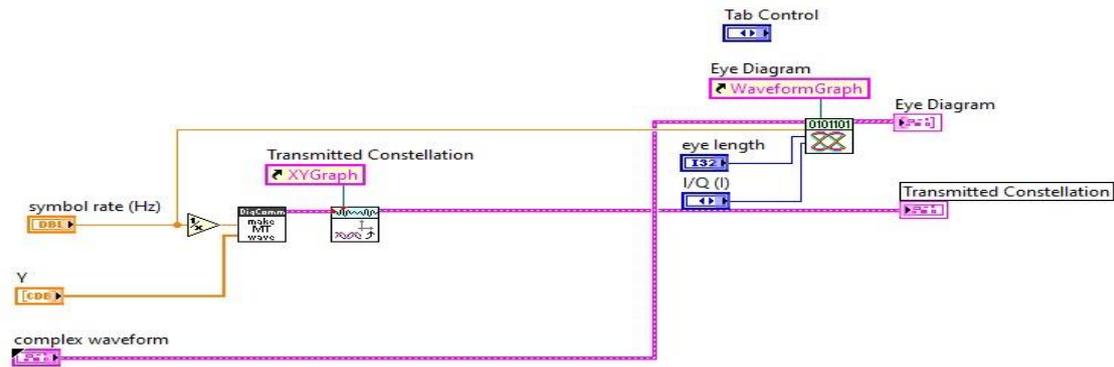


Figura 49: Diagramas propios de la transmisión-Modelo 2

VI Receptor

Recepción de datos: el tiempo establecido a los operadores de colas para la recepción de los datos, se identifican los símbolos recibidos según la modulación a la que fueron enviados y los prepara para demodular ya sea en QPSK o 64-QAM.

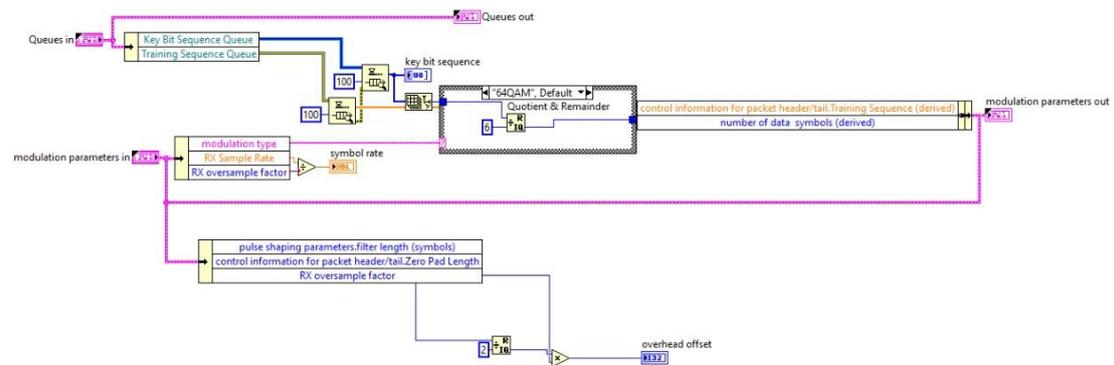


Figura 50: Recepción de datos-Modelo 2

Demodulación QPSK/64-QAM: los datos recibidos en forma de símbolos de bits son demodulados según el tipo de modulación que fue aplicado en la transmisión para consecuentemente proceder a la decodificación.

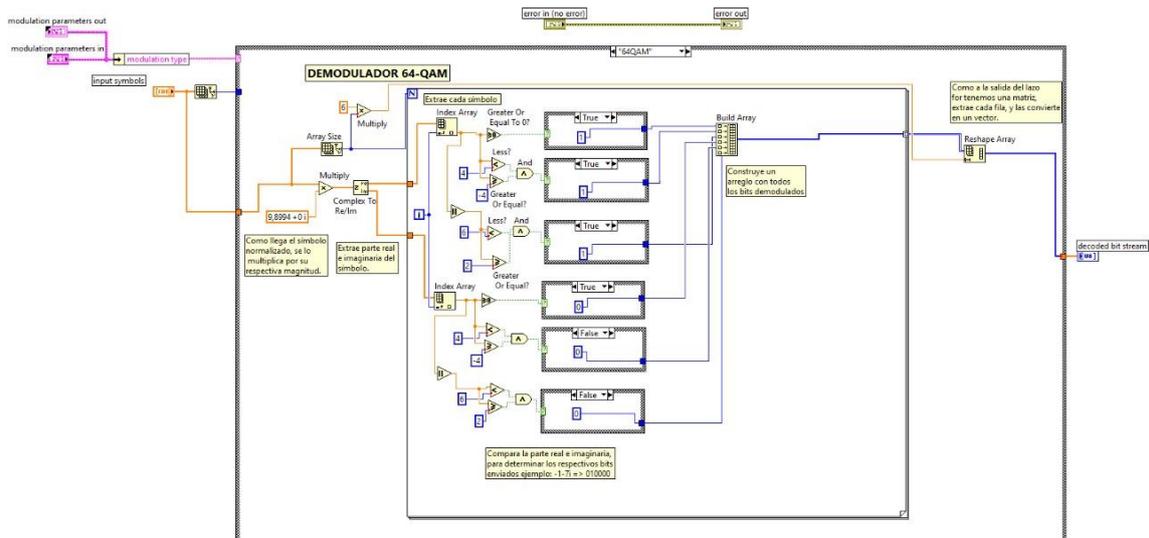


Figura 51: Demodulador QPSK/64-QAM-Modelo 2

Decodificador de paquetes: una vez que el paquete es detectado, se decodifica y se prepara para tener las gráficas de transmisión que comprueban la eficiencia o deficiencia de la señal recibida.

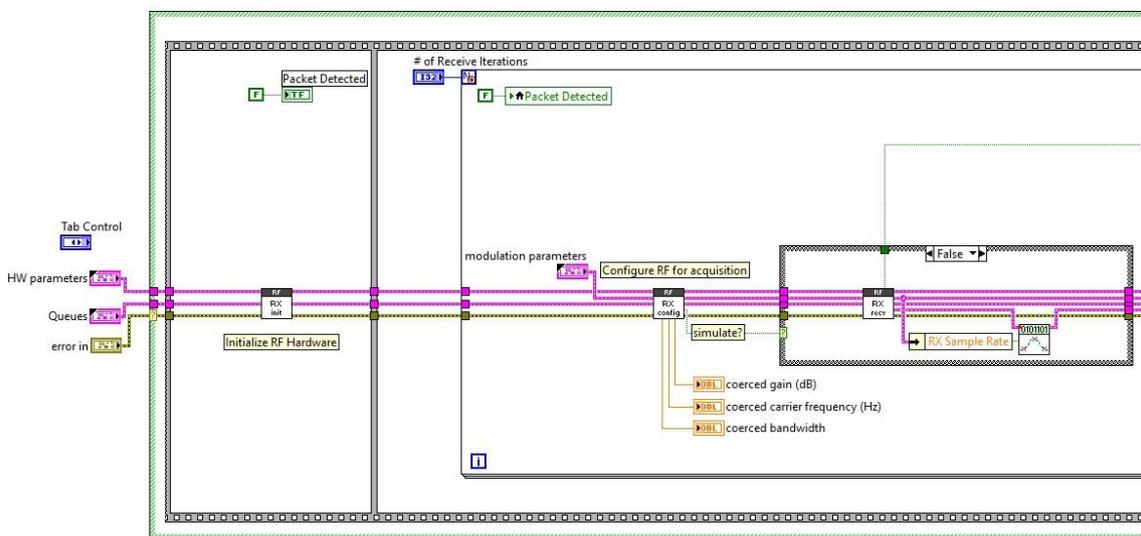


Figura 52: Decodificador de paquetes-Modelo 2

Gráficas de recepción de datos: se receipta el diagrama de constelación y el diagrama de ojo que fue transmitido para evidenciar las diferencias que disponen entre sí como

producto del proceso de transmisión y que permitan medir la tasa de error por bit (BER) de la transmisión de video.

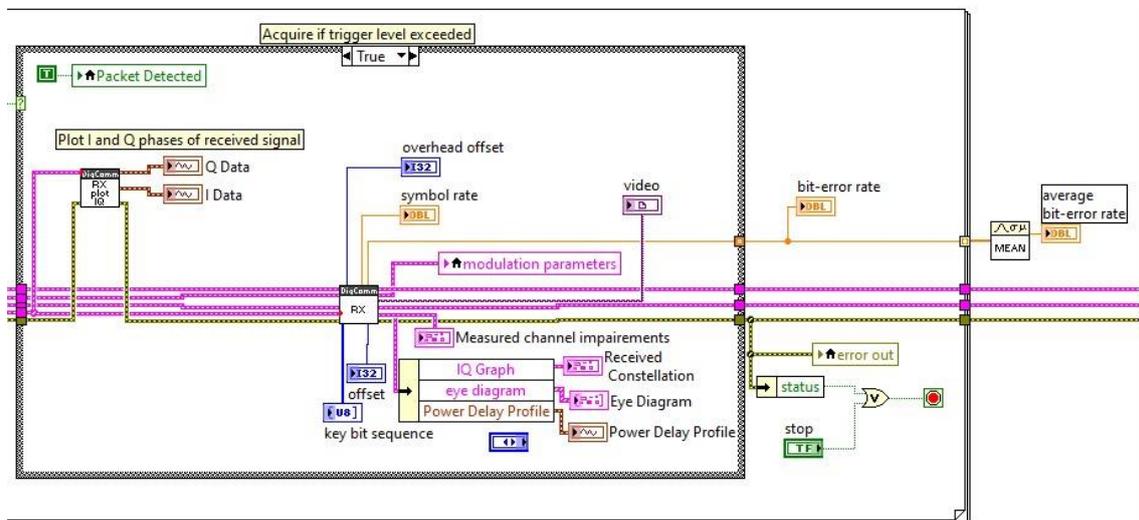


Figura 53: Diagramas propios de la recepción-Modelo 2

Espectro de señal: esta implementación de bloques dentro de la recepción, permiten adquirir la señal de espectro *wideband* con la finalidad de observar e identificar el ancho de banda de la señal que se está recibiendo y en la que se muestra en el panel frontal de este VI, difiriendo del modelo 1 en el que no se dispone esta funcionalidad.

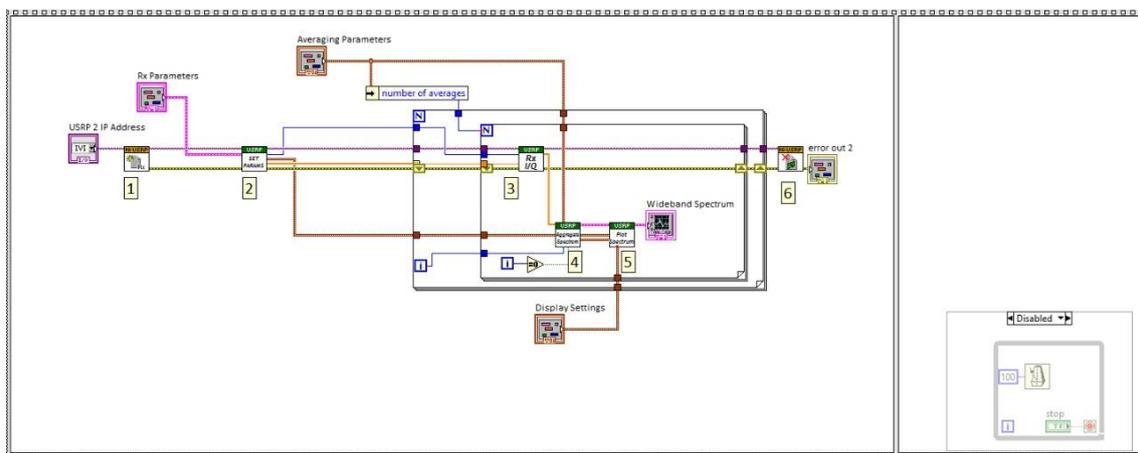


Figura 54: Espectro de señal recibida-Modelo 2

Recuperación de video digital: recupera los datos ya codificados y los transforma nuevamente en video que va a ser mostrado en el panel principal del VI receptor con cierta latencia como producto de la ejecución de todo el proceso de transmisión en tiempo real.

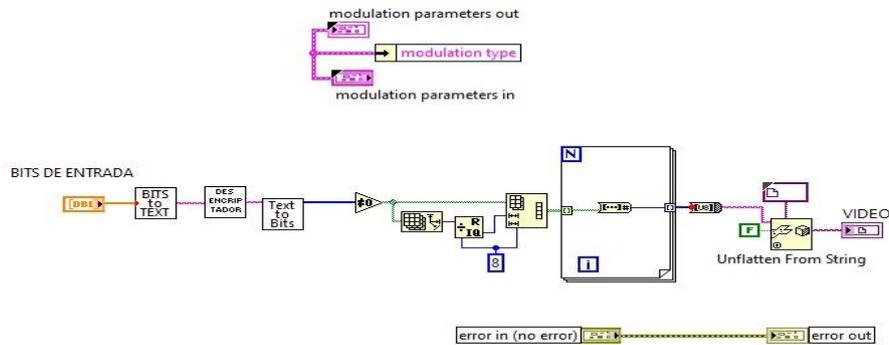


Figura 55: Recepción de video digital-Modelo 1

VI Simulador

El simulador convierte los Vis principales del transmisor y el receptor en sub-VIs y los ejecuta simultáneamente para mostrar los resultados finales producto de la transmisión de video, acompañado de un cuadro de errores que monitorea toda la transmisión y en caso de falla, arroja un mensaje específico del error. Los errores son fundamentales y por ello se calcula el error estadístico y el BER para evaluar numéricamente la ineficiencia del sistema.

Procesamiento simultaneo de TX y RX: se ejecuta simultáneamente el transmisor y el receptor, convirtiéndolos en sub-VIs del VI principal de simulación para adquirir graficas resultantes de toda la transmisión de video.

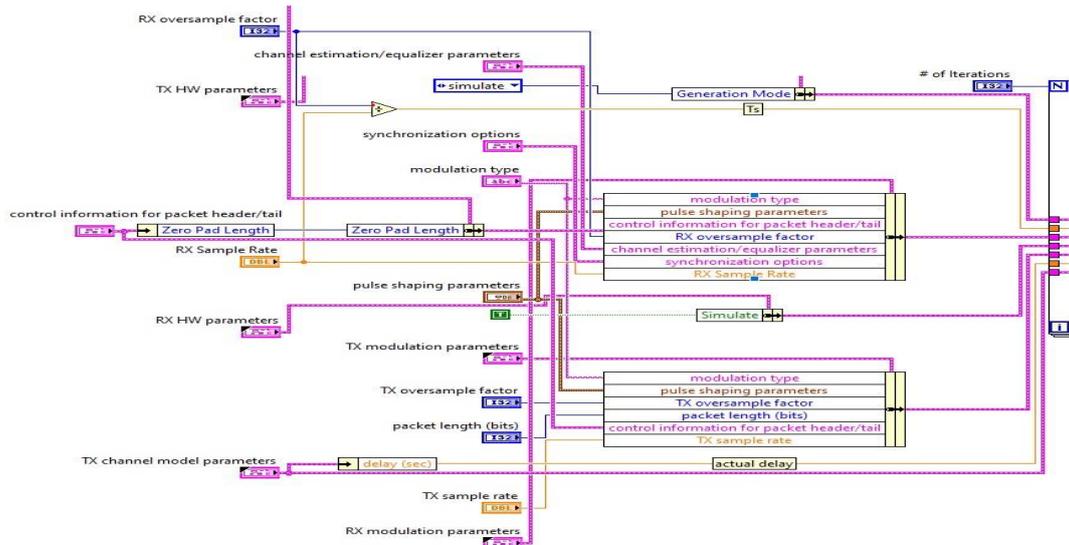


Figura 56: Ejecución simultánea de TX y RX para la simulación-Modelo 1

Diagramas resultantes de la transmisión de video: en la salida de toda la transmisión se presentan diagramas de constelación, diagramas de ojo, diagrama de señal recibida y retardo de potencia con la finalidad de evaluar cada ciclo de transmisión junto con los errores promediados de BER presentes en el enlace.

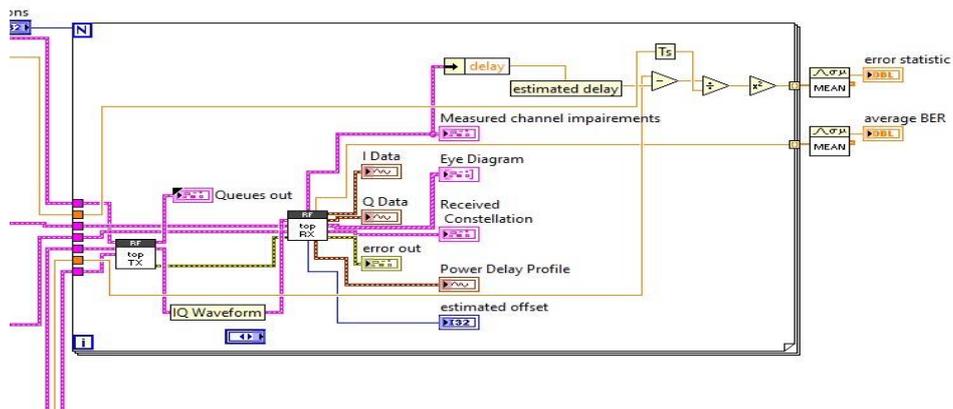


Figura 57: Diagramas resultantes de la transmisión de TX y RX- Modelo 1

ANEXO F: PRUEBAS DE DISPONIBILIDAD DE FRECUENCIAS

Primera prueba: la primera prueba realizada en el monitor de espectro

electromagnético se parametrizo con una frecuencia de inicio de 1,3 GHz hasta una frecuencia de 2 GHz, para poder identificar las frecuencias hábiles en ese rango de espectro monitoreado.

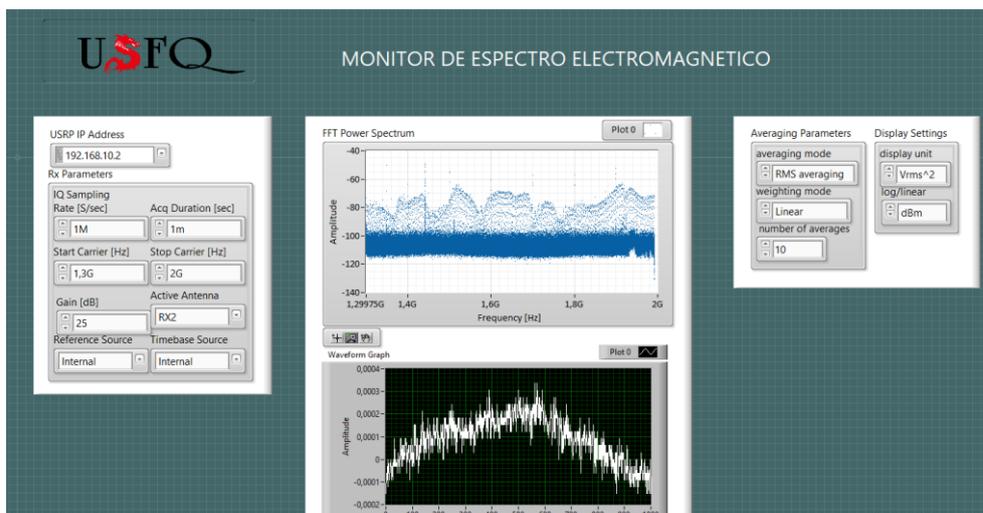


Figura 58: Primera prueba en el monitor de espectro electromagnético

Efectivamente se puede apreciar en la siguiente figura, que se observa una disponibilidad de frecuencias ubicadas entre 1,47 GHz hasta 1,50 GHz, que podrían ser utilizadas puesto que no se observan interferencias que puedan alterar o disminuir la potencia de la señal transmitida dentro del marco aceptable de error.

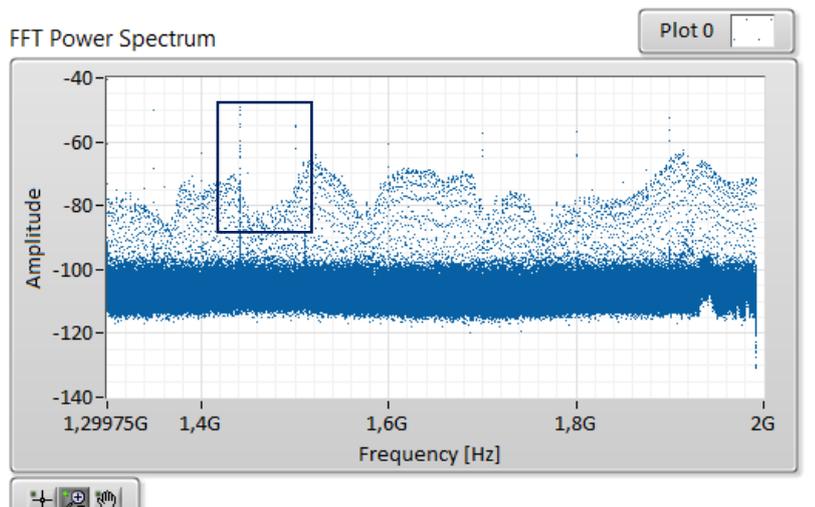


Figura 59: Resultado de espectro de prueba 1

Segunda prueba: en la segunda prueba del monitor de espectro electromagnético se amplió el rango de exploración de frecuencias que va desde 1,9 GHz hasta 2,5 GHz con las que se espera tener una FFT distinta a la primera prueba puesta que se está ejecutando a frecuencias más altas.

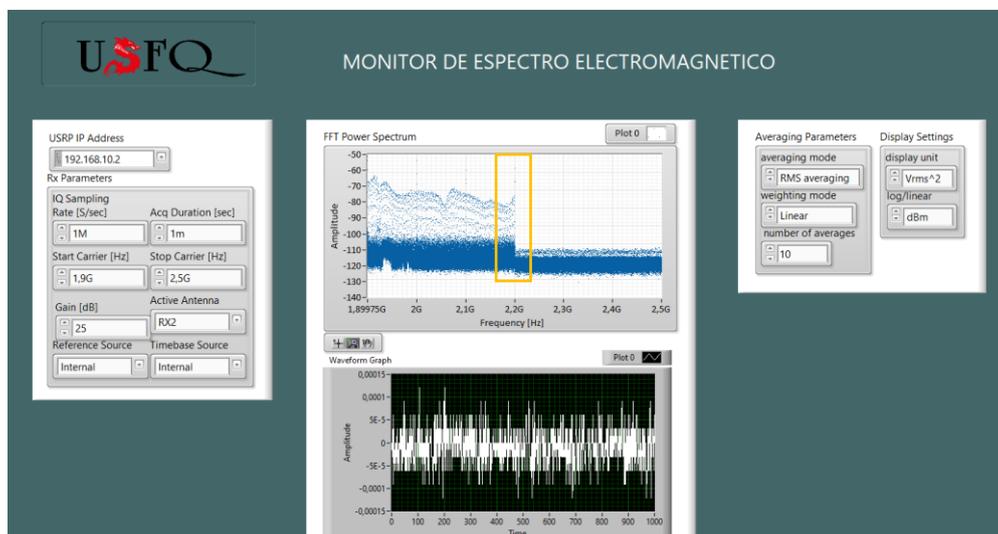


Figura 60: Segunda prueba en el monitor de espectro electromagnético

En la gráfica a continuación, se evidencian altos y bajos de interferencias en el rango de 1,9 GHz hasta 2,2 GHz, y es justo en el límite de 2,2 GHz que se observa un decaimiento considerable de la señal y esto se justifica precisamente por el alcance máximo de frecuencia que dispone el USRP 2920 que va desde los 50 MHz hasta los 2,2 GHz como lo especifica el fabricante.

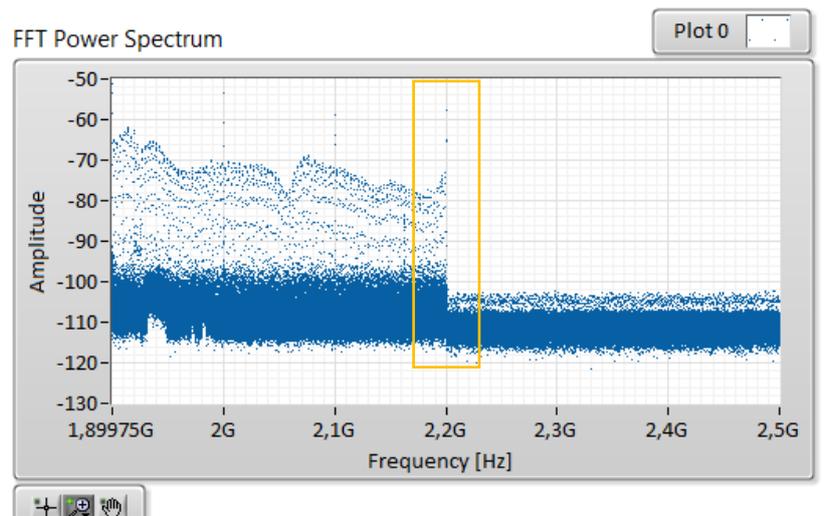


Figura 61: Resultado de espectro de prueba 2

Tercera prueba: en esta tercera prueba de monitoreo de espectro, se analizó el espectro de banda ancha en un rango de 2,2 GHz hasta 2,22 GHz siendo transmitida una señal desde el VI transmisor de 2,2 GHz, que corresponde a la frecuencia a la que se decidió ejecutar la transmisión de video.

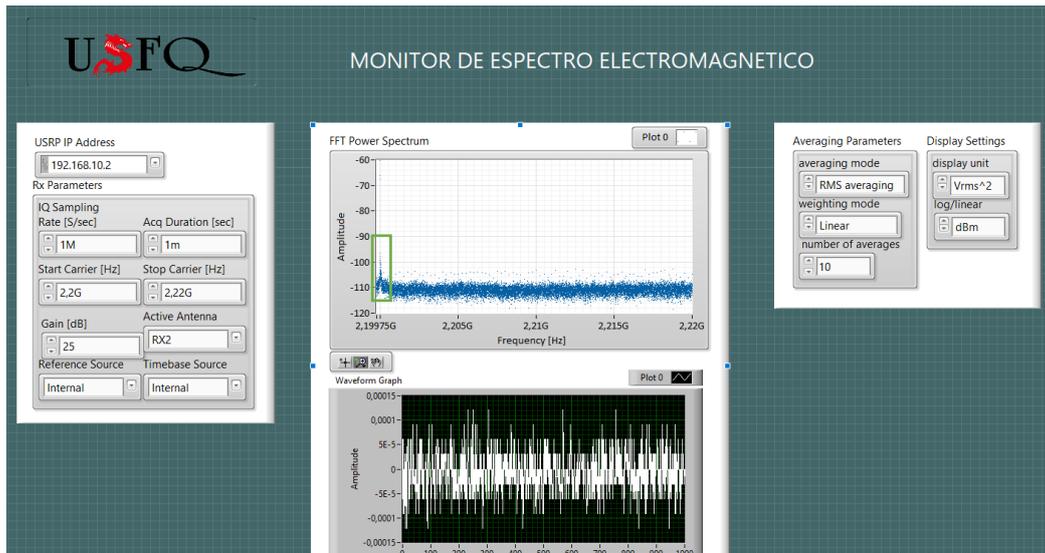


Figura 62: Tercera prueba en el monitor de espectro electromagnético

Claramente en el espectro de señal implementado en el VI receptor denominado como modelo 2, se evidencia una gráfica similar a la que el monitor de espectro electromagnético había detectado y que se imposibilita identificar con claridad cuál es realmente la señal de banda ancha que se esperaba identificar.

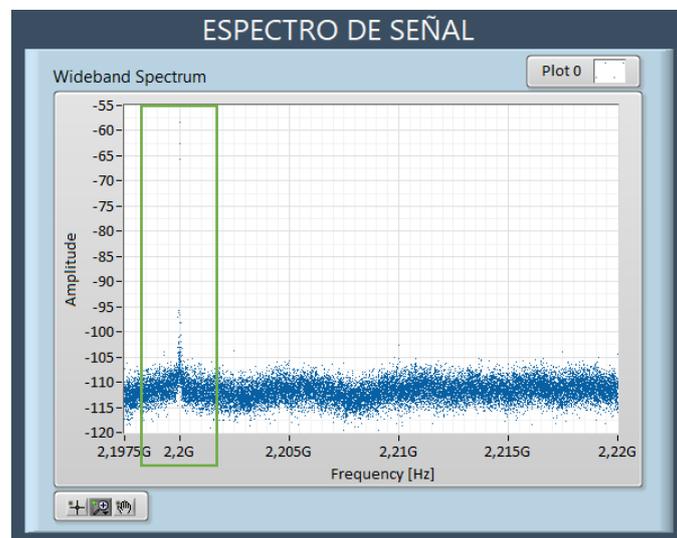


Figura 63: Resultado de espectro de señal en la recepción de la transmisión

Cuarta prueba: en esta prueba se aplicó frecuencias mucho más bajas que van desde 1 MHz hasta 100 MHz, con la finalidad de evaluar el comportamiento de las interferencias e identificar algún patrón en su comportamiento desde que entra en los 50 MHz que es la frecuencia en la que el USRP empezaría teóricamente a recibir frecuencias.

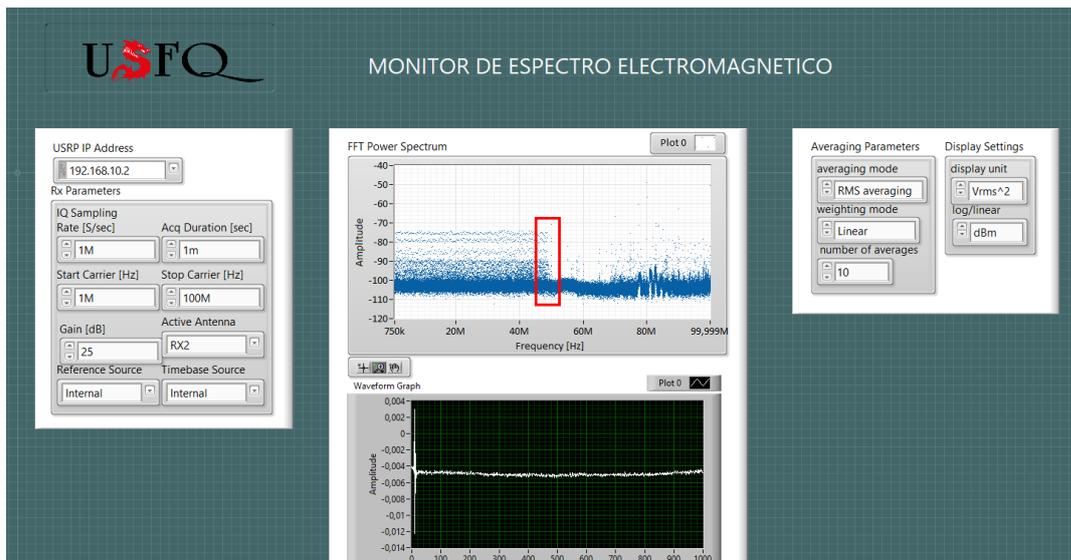


Figura 64: Cuarta prueba en el monitor de espectro electromagnético

Con claridad se observa en el recuadro de color rojo, que la señal a partir de los 50 MHz que es cuando el USRP empieza a procesar la señal se identifica un cambio notorio en la señal que percibe el monitor y que comprueba que el USRP si está trabajando desde la frecuencia más baja hasta la frecuencia más alta de operación.

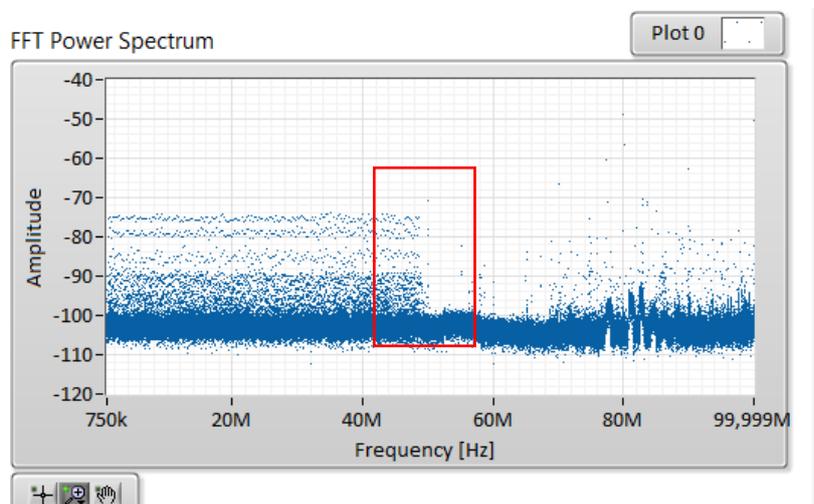


Figura 65: Resultado de espectro de prueba 4.

Quinta prueba: finalmente en la última prueba realizada consistió en cambiar la frecuencia en la transmisión a 2,18 GHz con una ganancia máxima de 31 dB para intentar observar alguna diferencia de lo que se ha venido obteniendo a partir de la frecuencia de 2,2 GHz y sobre todo comprobar que el espectro de banda ancha que se añadió al receptor si este ejecutándose al tiempo que la transmisión de video se está procesando.



Figura 66: Parámetros modificados en el VI de transmisión de señal

Se evidenció un cambio en el aspecto de las señales que se habían recibido con antelación, pero de igual forma no representa específicamente el ancho de banda que se esperaba obtener en el gráfico de espectro de señal implementado justamente en la recepción del enlace que evidentemente no se ha conseguido.

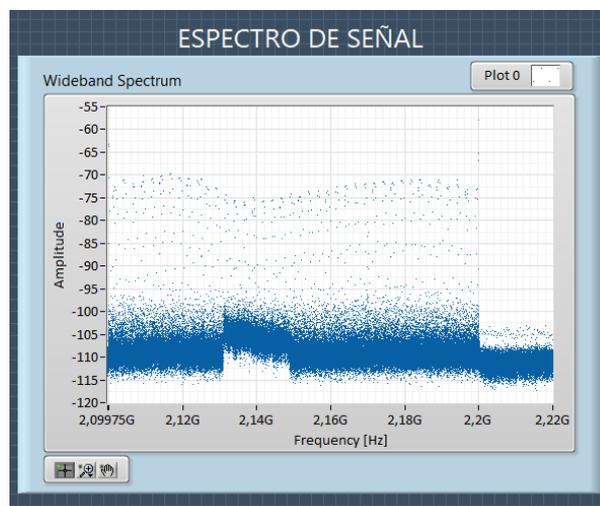


Figura 67: Resultado de espectro como respuesta a la frecuencia establecida en TX

ANEXO G: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL ENLACE

Modulación QPSK

Evaluación 1: esta primera evaluación de la calidad del enlace de transmisión de video viene dado por establecer parámetros del canal distintos a los recomendados y analizarlos. En este caso se aplicó en modulación QPSK un ruido del tipo AWGN inducido directamente en el canal de -20 dB

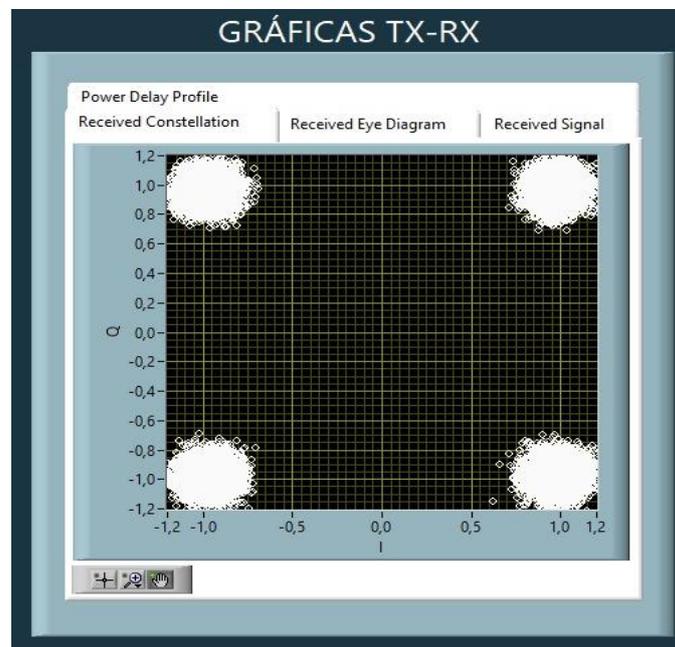


Figura 68: Diagrama de constelación con ruido AWGN de -20 dB

El diagrama de constelación resultante de la presencia de ruido muestra claramente como los 4 símbolos que pertenecen a este tipo de modulación se ven mucho más asentados y agrupados en las esquinas donde el ruido está envolviendo cada símbolo, haciendo que la transmisión de video si disponga de un retardo considerable ante la presencia de tal ruido llegando a los aproximadamente 5 segundos de retardo entre fotograma transmitido.

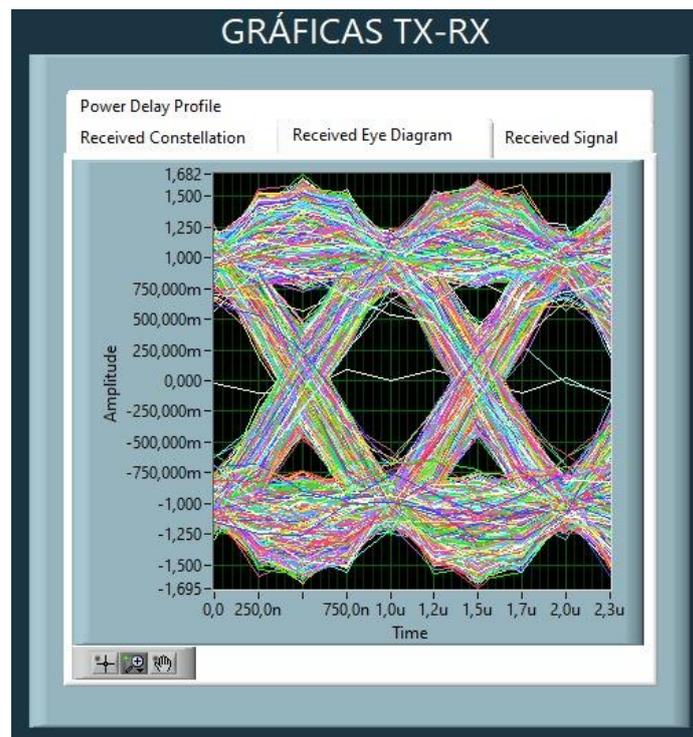


Figura 69: Diagrama de ojo con ruido AWGN de -20 dB

Por su parte el diagrama de ojo, que es la representación gráfica que denota la cantidad de ruido presente en el canal, muestra que la amplitud verticalmente del ojo es más pequeña de los resultados obtenidos con un ruido de -40 dB donde no se observó tanta interferencia en el canal. La interferencia en el canal viene corroborado por el valor de SNR presente a continuación.

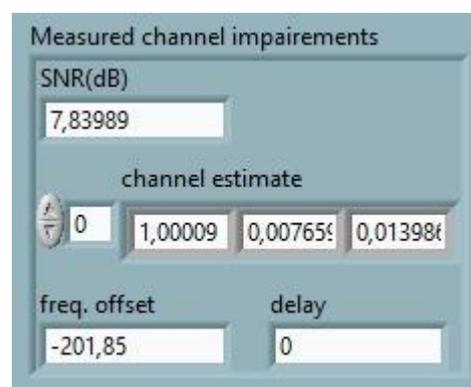


Figura 70: SNR de ruido de -20 AWGN en modulación QPSK

Modulación 64-QAM

Evaluación 2: esta segunda evaluación de la calidad del enlace de transmisión de video viene dado por establecer parámetros del canal distintos a los recomendado y analizarlos. En este caso se aplicó en modulación 64-QAM un ruido del tipo AWGN inducido directamente en el canal de -30 dB

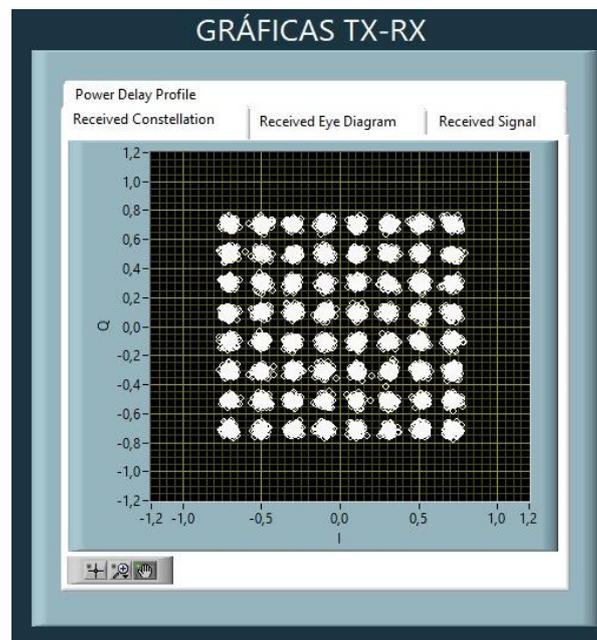


Figura 71: Diagrama de constelación con ruido AWGN de -30 dB

El diagrama de constelación resultante de la presencia de ruido muestra claramente como los 64 símbolos característicos de la modulación 64-QAM la cual se ve afectada parcialmente por el ruido de -30 dB, sin permitir aplicar un ruido más pequeño porque el sistema de transmisión de video, mostro error de ecualización y se ve interrumpida la transmisión.

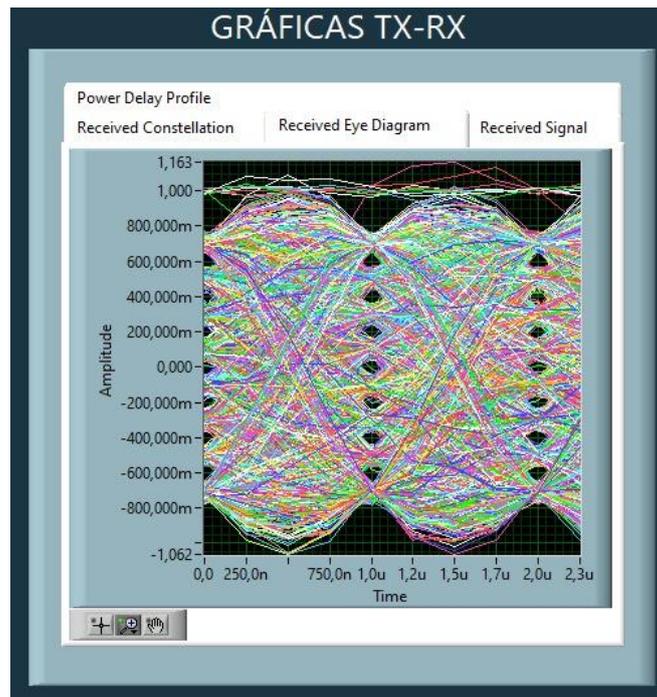


Figura 72: Diagrama de ojo con ruido AWGN de -30 dB

Por su parte el diagrama de ojo, que es la representación gráfica que denota la cantidad de ruido presente en el canal, muestra que la amplitud verticalmente del ojo es más pequeña de los resultados obtenidos con un ruido de -40 dB donde no se observó tanta interferencia en el canal y más en este diagrama que dispone de 8 diagramas de ojo superpuestos, es aún más notorio visiblemente. La interferencia en el canal viene corroborado por el valor de SNR presente a continuación.

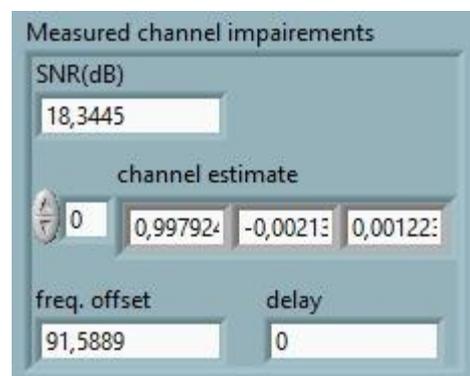


Figura 73: SNR de ruido de -30 AWGN en modulación 64-QAM