



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

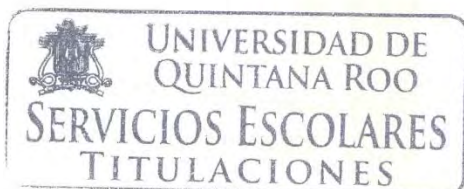
SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y
RECEPCIÓN DE DATOS USANDO
RADIOS DEFINIDOS POR SOFTWARE.

TRABAJO DE TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN REDES

PRESENTA
WALTER ARNOLDO RIVERA CETINA

DIRECTOR DE TESIS
DR. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO

ASESORES
DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR
MTI. VLADIMIR VENIAMIN CABAÑAS VICTORIA
MSI. LAURA YÉSICA DÁVALOS CASTILLA
MTI. MELISSA BLANQUETO ESTRADA



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN REDES**

COMITÉ DE TRABAJO DE TESIS

DIRECTOR:

DR. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO

ASESOR:

DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR

ASESOR:

MTI. VLADIMIR VENIAMIN CABAÑAS VICTOR



UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2017

Agradecimientos

A:

Al Dr. Javier Vázquez Castillo por su guía y colaboración durante cada momento de consulta y soporte durante este proyecto de tesis.

A todos los profesores involucrados en mi formación, sin su apoyo no podría haber obtenido todas las habilidades y conocimientos que necesite para lograr llegar donde estoy ahora.

A mis amigos y compañeros que estuvieron apoyándome en los bueno y malos momentos.

Este trabajo de tesis tuvo apoyo por parte de la beca recibida del “Proyecto Ciencia Básica 2014/241272” y apoyo SEP-PRODEP 2014.

Dedicatoria

A:

Este trabajo va dedicado a mi familia que siempre estuvo apoyándome en cada momento de este difícil camino, donde concluyo una parte de mi formación académica.

A los compañeros y amigos que cuando era necesario me brindaron su apoyo.

Resumen

Hoy en día los estándares de comunicaciones imponen nuevos retos en el desarrollo de sistemas de comunicaciones incrementando su complejidad y siendo necesario invertir más tiempo de investigación y desarrollo en lo relacionado a nuevas velocidades de transmisión, bajo consumo de potencia, tamaño reducido de los radios, entre otros. Por lo anterior, una nueva plataforma de radios definidos por software (SDR por sus siglas en inglés) ha venido a favorecer ese ambiente de complejidad, dando la posibilidad de disminuir el tiempo de lanzamiento de un determinado producto basado en radios. En este sentido, los SDR permiten de manera sencilla realizar adecuaciones en software acorde a las necesidades de diseño dictadas por nuevos estándares de comunicaciones. Es por ello que en este trabajo se presentan los conceptos generales de los radios definidos por software (SDR) para implementar sistemas de comunicaciones inalámbricas. Así mismo, proporciona el diseño base de un sistema de comunicaciones a través de la definición de cada uno de los componentes que lo conforman mediante el lenguaje de programación gráfico LabVIEW. El resultado final, es un sistema de comunicaciones basado en SDR que permite transmitir y recibir datos con diferentes portadoras y modulaciones. Al ser basado en software, de manera sencilla nuevos requerimientos de los estándares pueden ser incorporados, facilitando el desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones.

Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivo General.....	2
1.4 Objetivos Específicos.....	2
1.5 Alcance:	2
1.6 Metodología:	2
Capítulo 2 Marco Teórico	1
2.1 LabVIEW	1
2.1.1 Entorno de desarrollo abierto.....	3
2.1.2 Multiplataforma.....	3
2.1.3 Reduce los costos preserva la inversión.....	4
2.1.4 Desarrollo distribuido.....	4
2.1.5 Capacidad de análisis	4
2.1.6 Flexibilidad y escalabilidad.....	5
2.1.7 Desarrollo modular.....	5
2.2 Radio Definido por Software	5
2.2.1 SDR	7
2.2.2 Ventajas.....	8
2.2.3 Desventajas.....	9
2.2.4 Tipos de radios en el mercado.....	10
2.2.4.1 National Instruments.....	10
2.2.4.2 WiNRADiO.....	11
2.2.4.3 S&C Electric Company.....	11
2.3 Sistemas de comunicaciones inalámbricas.....	13
2.3.1 Radio digital	13
2.3.2 Modulación por desviación de frecuencia (FSK).....	13
2.3.2.1 Transmisor FSK.....	14
2.3.2.2 Ancho de banda en FSK.....	15
2.3.2.3- Receptor FSK.....	17
2.3.3- Modulación por desviación de fase (PSK).....	18

2.3.4- Modulación por desviación de fase binaria (BPSK).....	19
2.3.4.1- Transmisor de BPSK.....	20
2.3.4.2- Ancho de banda en BPSK.....	21
2.3.4.3- Receptor BPSK.....	22
2.3.5- Modulación por desviación de fase cuaternaria (QPSK).....	24
2.3.5.1- Transmisor QPSK.....	24
2.3.5.2- Ancho de banda para QPSK.....	25
2.3.5.3- Receptor QPSK.....	26
2.3.6- PSK de ocho fases (8-PSK).....	28
2.3.6.1- Transmisor PSK de ocho fases.....	28
2.3.6.2- Ancho de banda en 8-PSK.....	29
2.3.6.3- Receptor 8-PSK.....	29
2.3.7- Modulación por amplitud en cuadratura.....	30
2.3.8- QAM de ocho (8-QAM).....	30
2.3.8.2- Ancho de banda para el QAM de ocho.....	31
2.3.8.3- Receptor QAM de ocho.....	31
Tabla de estándares IEEE 802.11p.....	32
Capítulo 3 Desarrollo.....	33
3.1 USRP.....	33
3.1.1 NI USRP-2920.....	33
3.1.1.1 Estructura interna del Hardware NI USRP-2920.....	34
3.1.1.2 Características de NI USRP-2920.....	34
3.1.1.3 Interfaces del NI USRP-2920.....	35
3.1.2 Configuración inicial NI USRP-2920.....	35
3.1.2.1 Cambio de IP de USRP.....	36
3.2 Bloques principales para NI USRP-2920.....	37
3.2.1 Bloques de Transmisor.....	37
3.2.1.1 Parámetros de configuración.....	38
3.2.1.2 Flujo básico de programación.....	38
3.2.1.3 Iniciar una sesión USRP Tx.....	39
3.2.1.4 Configurar señal Tx.....	40
3.2.1.5 Escribir datos Tx.....	41

3.2.1.6 Cerrar sesión de Tx.....	42
3.2.2 Bloques de Receptor.....	43
3.2.2.1 Iniciar sesión de un USRP Rx.....	43
3.2.2.2 Inicia la adquisición de señal USRP Rx.....	44
3.2.2.3 Inicia la recolección de datos USRP Rx.....	45
3.2.2.4 Detener la adquisición iniciada USRP Rx.....	46
3.2.2.5 Cerrar sesión de USRP Rx.....	47
3.3 Descripción niUSRP EX PSK Tx.vi Block Diagram	48
3.3.1 Open Tx Session.....	49
3.3.2 Configure Signal.....	50
3.3.3 Write Tx Data	51
3.3.4 Close session.....	52
3.4 Descripción niUSRP EX PSK Rx.vi Block Diagram	52
3.4.1 Open Rx Session	54
3.4.2 Configure signal	55
3.4.3 Initiate	55
3.4.4 Fetch Rx Data	56
3.4.5 Analyze and Present Data	56
3.4.6 Abort Rx.....	57
3.4.7 Close Session Rx.....	58
Capítulo 4 Resultados y Conclusiones	59
4.1 Conexión física del dispositivo.....	59
4.1.1 Dispositivos requeridos	59
4.1.1.1 Computadora.....	59
4.1.1.2 Radio USRP 2920	60
4.2 Descripción niUSRP EX PSK Tx.vi Front Panel	63
4.2.1 Descripción de interfaz.....	64
4.2.1.1 Device name.....	64
4.2.1.2 Tabla de configuración	64
4.2.1.3 Filter parameters	65
4.2.1.4 Choose a PSK 4 Format.....	65
4.2.1.5 Tx Signal Constellation.....	66

4.2.2 Representación de constelaciones de transmisor.....	66
4.3 Descripción niUSRP EX PSK Rx.vi Front Panel	70
4.3.1 Descripción de interfaz.....	70
4.3.1.1 Device name.....	70
4.3.1.2 Tabla de configuración	71
4.3.1.3 Choose a PSK format.....	71
4.3.1.4 Measurements.....	72
4.3.1.5 Constellation Graph.....	72
4.3.2 Representación de constelaciones de receptor.	73
4.4 Conclusiones	77
Bibliografía.....	78

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Conexión de lavadora inteligente por medio de señales de radio.	3
Ilustración 2: Interfaz de usuario.....	2
Ilustración 3: Diagrama de bloques.	3
Ilustración 4: Diagrama de bloques funcionales de SDR.....	6
Ilustración 5: Transmisor FSK binario.....	15
Ilustración 6: Modulador FSK a base de OCV.....	16
Ilustración 7: Demodulador de FSK.....	18
Ilustración 8: Modulador BPSK.....	19
Ilustración 9: Modulador balanceado.....	19
Ilustración 10: Entrada en 1 lógico.	19
Ilustración 11: Entrada en 0 lógico.	20
Ilustración 12: Relación de la fase de salida contra tiempo para un modulador BPSK.	22
Ilustración 13: Receptor BPSK.	23
Ilustración 14: Modulador QPSK.	25
Ilustración 15: Receptor de QPSK.....	27
Ilustración 16: Modulador 8-PSK.....	29
Ilustración 17: Receptor 8-PSK.	30
Ilustración 18: Diagrama a bloques de un transmisor de 8-QAM.	31
Ilustración 19: NI USRP-2920.....	33
Ilustración 20: Estructura interna NI USRP-2920.	34
Ilustración 21: Configuración del adaptador de red.	36
Ilustración 22: NI-USRP Configuration Utility.....	36
Ilustración 23: Bloques principales de NI-USRP.....	37
Ilustración 24: Flujo general de programación.....	38
Ilustración 25: Esquema básico del transmisor.	39
Ilustración 26: niUSRP Open Tx Session.vi.....	39
Ilustración 27: niUSRP Configure Signal.vi	40
Ilustración 28: niUSRP Write Tx Data(CDB Cluster).	41
Ilustración 29: niUSRP Close Session Rx.vi.....	42
Ilustración 30: Esquema básico de receptor.....	43
Ilustración 31: niUSRP Open Rx Session.vi	44
Ilustración 32: niUSRP Initiate.vi	44
Ilustración 33: niUSRP Fetch Rx Data (poly).vi	45
Ilustración 34: niUSRP Abort.vi	47
Ilustración 35: niUSRP Close Session Tx.vi	47
Ilustración 36: niUSRP EX PSK Tx.vi	49
Ilustración 37: Open Tx Session del transmisor.	49
Ilustración 38: Open Tx Session configuración.....	50
Ilustración 39: Configure Signal 1 del transmisor.	50
Ilustración 40: Configure Signal 2 del transmisor.	51
Ilustración 41: Write Tx Data.	51
Ilustración 42: Close Session transmisor.....	52

Ilustración 43: niUSRP EX PSK Rx.vi parte 1.....	53
Ilustración 44: niUSRP EX PSK Rx.vi parte 2.....	53
Ilustración 45: Open Rx Session.	54
Ilustración 46: Open Rx Session configuración.	54
Ilustración 47: Comfigure Signal Rx.	55
Ilustración 48: Initiate.....	55
Ilustración 49: Fetch Rx Data	56
Ilustración 50: Analyze Data.....	56
Ilustración 51: Present Data.	57
Ilustración 52: Abort.....	57
Ilustración 53: Abort configuración.	58
Ilustración 54: Close session Rx.....	58
Ilustración 55: Computadora para manejo de SDR.	59
Ilustración 56: Especificaciones de la computadora.	60
Ilustración 57: Radio NI-USRP 2920.	60
Ilustración 58: Antenas de USRP.	61
Ilustración 59: Puertos Tx y Rx de USRP.	61
Ilustración 60: Cable UTP categoría 5.....	61
Ilustración 61: Conectores de UTP categoría 5.	62
Ilustración 62: NI-USRP 2920 conectado.	62
Ilustración 63: niUSRP EX PSK Tx.vi Front Panel.....	63
Ilustración 64: Device name de Tx.	64
Ilustración 65: Tabla de configuración.	64
Ilustración 66: Filter parameters.	65
Ilustración 67: Choose a PSK Format.	65
Ilustración 68: Tx Signal Constellation.....	66
Ilustración 69: Representación gráfica de transmisor 8-PSK.....	67
Ilustración 70: Representación gráfica de transmisor 16-PSK.....	67
Ilustración 71: Representación gráfica de transmisor OQPSK.	68
Ilustración 72: Representación gráfica de transmisor QPSK.....	68
Ilustración 73: Representación gráfica de transmisor BPSK.	69
Ilustración 74: Representación gráfica de transmisor pi/4DQPSK.....	69
Ilustración 75: niUSRP EX PSK Rx.vi Front Panel	70
Ilustración 76: Device name de Rx.	70
Ilustración 77: Tabla de configuración.	71
Ilustración 78: Choose a PSK format.....	71
Ilustración 79: Measurements.....	72
Ilustración 80: Constellation Graph.....	72
Ilustración 81: Representación gráfica de recepción de 8-PSK.....	73
Ilustración 82: Representación gráfica de recepción de 16-PSK.....	74
Ilustración 83: Representación gráfica de recepción de OQPSK.	74
Ilustración 84: Representación gráfica de recepción de QPSK.	75
Ilustración 85: Representación gráfica de recepción de BPSK.....	75

Ilustración 86: Representación gráfica de recepción de $\pi/4$ DQPSK..... 76

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

Actualmente, la creciente demanda de conectividad vía inalámbrica de dispositivos móviles y no móviles ha hecho que muchos diseñadores de aplicaciones tengan que desarrollar nuevos dispositivos para la transmisión y recepción de datos. En particular, las soluciones orientadas a Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) motivan a que las etapas de radio embebidas en los diseños en hardware de IoTs sean de bajo costo, bajo consumo energético y en general de fácil manipulación o configuración. En este sentido, actualmente se cuenta con la plataforma de radio abierta conocida como radio definido por software (SDR por sus siglas en inglés) que posibilita tener conocimiento de bloques de radio funcionales y que al personalizarlos pueden ser integrados a diseños con el requerimiento de conectividad inalámbrica.

1.2 Justificación:

Hoy en día, existen varios diseños de tarjeta SDR comerciales, las cuales son adaptadas por parte de los diseñadores de sistema para ser utilizadas en aplicaciones específicas de radio como AM, FM, Bluetooth, WiFi, WiMAX, 802.11p (radios orientados a comunicaciones de vehículo a vehículo), entre otros. Por lo anterior, los diseñadores deben especializarse en la operación de los radios SDRs y en consecuencia plantear las adecuaciones necesarias en los diseños base. Así, mismo, deben conocer toda la interfaz y configuración de los radios para lograr el objetivo de transmitir/recibir información en un sistema de comunicaciones. Es por ello, que este trabajo de tesis busca proponer una plantilla base de configuración para implementar un sistema de comunicaciones, a nivel capa física, y así realizar estudios sobre estimación de canal de comunicaciones en un futuro.

1.3 Objetivo General.

Implementar un sistema de transmisión y recepción inalámbrica de datos mediante el uso de la plataforma de radio definido por software.

1.4 Objetivos Específicos.

- Estudiar a los sistemas de comunicaciones inalámbricos.
- Investigar los radios disponibles bajo el esquema SDR.
- Definir el entorno de programación para llevar a cabo la manipulación de un radio SDR.
- Elaborar los códigos de configuración y manipulación relacionados al radio SDR.
- Proponer un sistema de comunicaciones base.
- Evaluar el sistema de comunicaciones inalámbrico implementado

1.5 Alcance:

El alcance de este proyecto se basa en la propuesta de los códigos de configuración para cada uno de los bloques del radio Universal Software Radio Peripheral (USRP) y que sirvan para implementar el sistema de comunicaciones real. Las limitaciones de modulación del sistema implementado están definidas por las características del radio con el que actualmente se dispone en la Universidad. El radio USRP-2920 puede operar con modulaciones AM, FM, PM, ASK, FSK, MSK, GMSK, PSK, QPSK, PAM y QAM. Así mismo, la portadora del radio con el que se cuenta solo puede definirse del rango de los 50 MHz a 2.2 GHz y ser utilizado en estándares de comunicaciones como broadcast radio, TV digital, GSM, GPS, 802.11 (WiFi) y ZigBee.

1.6 Metodología:

Primeramente, se estudiarán los diferentes esquemas de transmisión/recepción de datos que son ampliamente utilizados en sistemas de comunicaciones inalámbricas. En particular los sistemas basados en esquemas QAM y QPSK multinivel. Se realizarán simulaciones de transmisión/recepción de datos utilizando un software de programación como puede ser LabVIEW.

Una vez realizadas las simulaciones de un sistema de comunicaciones, se deberá definir una plataforma SDR la cual vaya a ser utilizada para realizar la transmisión final de datos de manera física. Actualmente en la Universidad de Quintana Roo se cuenta con la plataforma de radios conocidos como Universal Software Radio Peripheral (USRP).

Posterior a ello se deberán desarrollar los códigos con el lenguaje de programación más conveniente para llevar a cabo la manipulación del sistema de comunicaciones físico (nuestro caso LabVIEW). Finalmente, se integrarán los dispositivos USRP al sistema de comunicaciones propuesto y se realizarán transmisiones de datos entre diversos puntos de la Universidad.

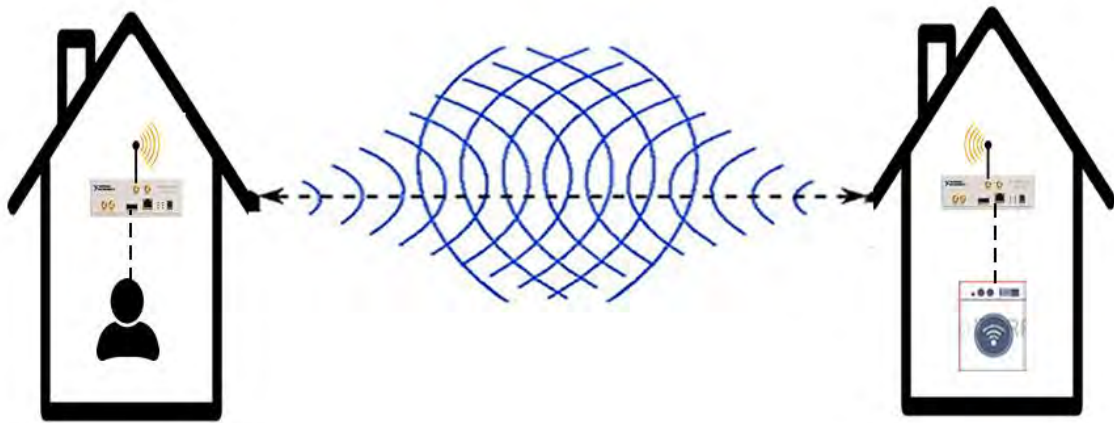


Ilustración 1: Conexión de lavadora inteligente por medio de señales de radio.¹

¹ Elaboración propia

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 LabVIEW

En la actualidad, la instrumentación virtual es de gran utilidad para realizar pruebas de control y medición en distintos ámbitos de desarrollo de aplicaciones o programas y para solucionar las diversas problemáticas que se van presentando día a día.

LabVIEW es un potente entorno de desarrollo de estilo gráfico para la adquisición de señales, el análisis de medidas y la presentación de datos, dando flexibilidad de un lenguaje de programación más fácil de usar que las herramientas de desarrollo tradicionales. Desde 1986, cuando National Instruments lanzó LabVIEW para Macintosh, ha atraído rápidamente y consistentemente a ingenieros y científicos que buscan un lenguaje de programación productiva y poderosa para usar en aplicaciones de prueba, control y diseño. Hoy en día, LabVIEW es el entorno de desarrollo gráfico preferido por miles de ingenieros y científicos, esto debido a que cuenta con las herramientas de software adecuadas que les dan a estos la habilidad de crear de manera eficiente sus propias aplicaciones, diseñando e integrando las rutinas que requiere un proceso particular. También, se pueden crear interfaces de usuario que se pueden ir adecuando para que se adapte al propósito de la aplicación para hacer fácil la interacción del usuario con el programa como se muestra en la ilustración 2.

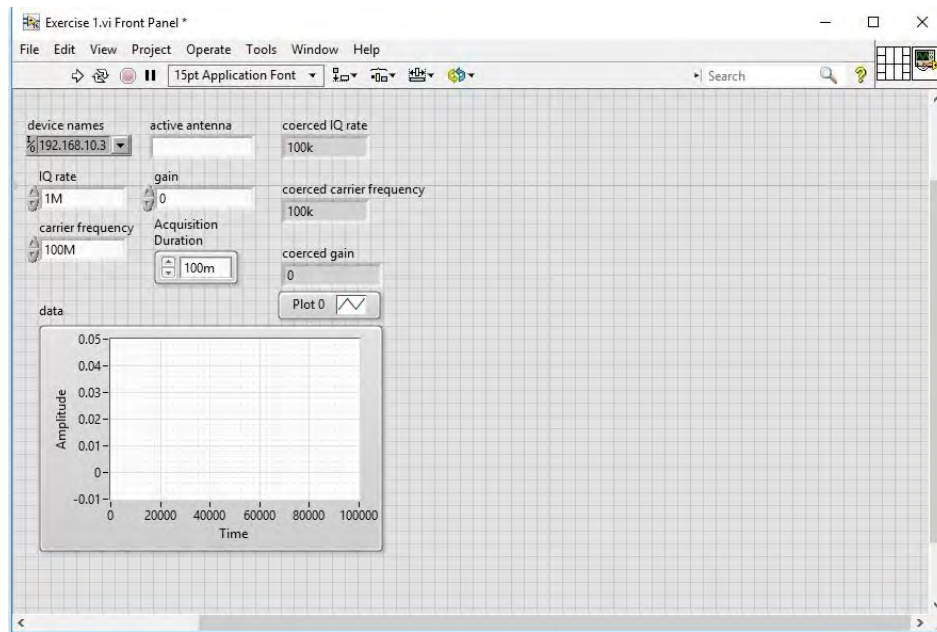


Ilustración 2: Interfaz de usuario.

De igual manera, se puede definir como y cuando la aplicación adquiere datos del dispositivo, como procesa, manipula y almacena datos y la manera de que se presentan los resultados al usuario. Una ventaja muy importante que proporciona el software es la modularidad, cuando se trata de un proyecto grande, los ingenieros y científicos generalmente abordan la tarea dividiéndola en pequeñas tareas. Estas sub-tareas son más manejables y fáciles de probar, dadas las dependencias reducidas que podrían causar un comportamiento inesperado. Puede diseñarse un instrumento virtual para resolver cada una de estas sub-tareas, y luego unirlos en un sistema completo para resolver la tarea más grande. La facilidad con la que se realiza todo este proceso depende de gran medida de la arquitectura subyacente del software. [1]

La creación de instrumentos virtuales por medio de LabVIEW es muy práctica por que proporciona un entorno de desarrollo fácil de usar diseñado específicamente con las necesidades de ingenieros y científicos. De igual manera ofrece potentes funciones que facilitan la conexión a una amplia variedad de hardware y otro software. La programación gráfica de LabVIEW está conformada por diagramas de bloques donde se van procesando la información que ya sea proporcionada por el usuario o el desarrollador en caso, en la ilustración 3 se muestra un diagrama de bloques de programación sencillo.

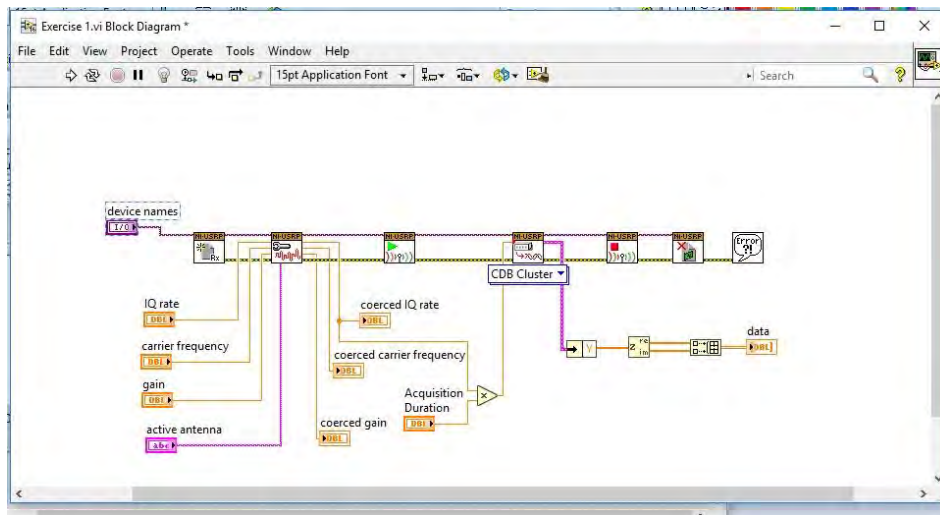


Ilustración 3: Diagrama de bloques.

2.1.1 Entorno de desarrollo abierto.

LabVIEW también es un entorno de desarrollo abierto. La estandarización del software depende en gran medida de la capacidad del paquete seleccionado para trabajar con otro software, hardware de medición y control. Además, conforme a estándares comerciales abiertos, LabVIEW reduce el costo general del sistema. Un gran número de proveedores de hardware y software de terceros desarrollan y mantienen cientos de librerías de LabVIEW y controladores de instrumentos para permitir que los usuarios utilicen fácilmente sus productos con LabVIEW.

2.1.2 Multiplataforma.

La mayoría de los sistemas informáticos utilizan una variación Windows. Sin embargo otras opciones ofrecen claras ventajas para ciertos tipos de aplicaciones. El desarrollo en tiempo real y embebido continúa creciendo rápidamente en la mayoría de las industrias, este proceso va presentando varias problemáticas, para minimizar las pérdidas resultantes del cambio a nuevas plataformas es importante y elegir el software adecuado para este propósito es un factor clave. LabVIEW se ejecuta en Windows 2000, NT, XP, Me, 98 y 95, así como Mac OS, Sun Solaris y Linux. LabVIEW es independiente de la plataforma; instrumentos virtuales que se desarrollan en una plataforma pueden ser portados de forma transparente a cualquier otra plataforma de

LabVIEW. A medida que surgen una fácil migración de aplicaciones a nuevas plataformas y nuevos sistemas operativos. Mediante la creación de plataformas de instrumentos independientes virtuales y portando aplicaciones entre ellas mismas, el tiempo de desarrollo y otros inconvenientes relacionados con la portabilidad de plataformas se minimizan. [1]

2.1.3 Reduce los costos preserva la inversión.

Un única computadora equipada con LabVIEW puede ser utilizado para innumerables aplicaciones y propósitos, por lo que se considera un producto versátil. No solo es versátil, si no es extremadamente rentable. La instrumentación virtual con LabVIEW resulta ser económica, no solo en los costos de desarrollo reducidos, sino también en su preservación de la inversión de capital durante un largo periodo de tiempo. Cuando el usuario necesita un cambio el sistema puede modificarse fácilmente sin necesidad de comprar nuevos equipos. El usuario también puede crear bibliotecas completas de instrumentación por menos que el costo de un solo instrumento comercial tradicional.

2.1.4 Desarrollo distribuido.

El usuario tiene la facilidad de desarrollar aplicaciones distribuidas con LabVIEW en distintas plataformas. LabVIEW de igual manera cuenta con varias herramientas de apoyo en sus servidores que son de fácil utilización, por ejemplo el usuario puede descargar rutinas de procesamiento intenso a otras máquinas para una ejecución más rápida, o crear aplicaciones de monitoreo y control remoto. La potente tecnología de servidor puede simplificar la tarea de desarrollar aplicaciones grandes. Además, LabVIEW incluye tecnologías de red estándar como lo es TCP/IP, e incorpora robustos protocolos.

2.1.5 Capacidad de análisis

Todo software de instrumentación virtual tiene el requerimiento de un análisis exhaustivo y herramientas de procesamiento de señales, porque la aplicación no solo se detiene cuando se recopilan datos. Las aplicaciones de medición de alta velocidad en sistemas de monitoreo y control

de máquinas suelen requerir un análisis de pedidos para obtener datos precisos. Además, de las librerías de análisis avanzadas que ya están incluidas en LabVIEW.

2.1.6 Flexibilidad y escalabilidad

Los desarrolladores mayormente ya sean ingenieros y científicos tiene necesidades y requerimientos que tiene un cambio constante. También necesitan tener soluciones extensibles que puedan ser utilizadas durante mucho tiempo. Al crear instrumentos virtuales basados en un software de desarrollo como LabVIEW, esto asegura no solo que las aplicaciones funcionen bien hoy, sino que pueden ser fácilmente integradas con las nuevas tecnologías en el futuro a medida que estén disponibles, o soluciones extendidas más allá del alcance original, a medida que se identifiquen nuevos requisitos. Además, cada aplicación tiene sus propios requisitos únicos que requieren una amplia gama de soluciones.

2.1.7 Desarrollo modular

Un proyecto de gran tamaño o importancia puede desglosarse en unidades más pequeñas para simplificar la complejidad de la programación. El desarrollador puede administrar y probar fácilmente estas sub-tareas para reducir las dependencias que podrían causar un comportamiento inesperado. Una vez resueltas estas sub-tareas, el desarrollador puede unir las para completar el sistema. La facilidad en que el usuario puede lograr esta división de tareas depende en gran medida de la arquitectura del software. [1]

2.2 Radio Definido por Software

Hoy en día los sistemas de comunicación por radio se encuentran en constante desarrollo en el ámbito de las Telecomunicaciones, por ejemplo, telefonía celular, comunicaciones inalámbricas, radiodifusión sonora, etc., los cuales presentan problemas de diferente índole. Hasta ahora, estas exigencias han tenido un carácter contradictorio y los esfuerzos de una normalización mundial han fracasado en su mayor parte. [2]

Sin embargo, para poder considerar la integración de múltiples arquitecturas de comunicaciones no sólo se debe tomar en cuenta el nivel de hardware sino también la parte de software que establece los pasos a seguir para realizar una comunicación. [2]

Esencialmente de la misma configuración básica que se muestra en Ilustración 4.

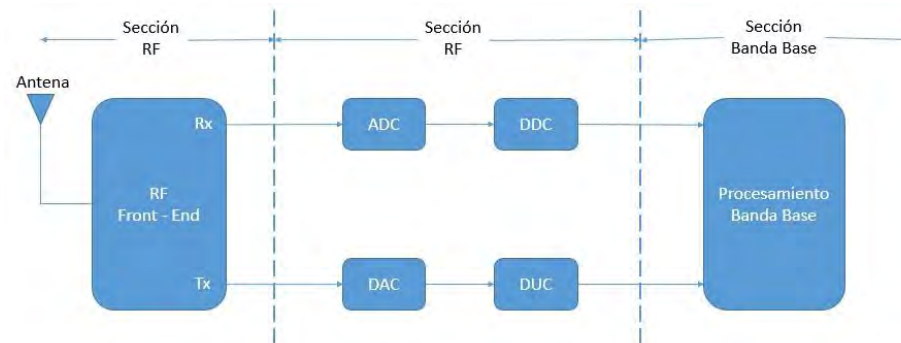


Ilustración 4: Diagrama de bloques funcionales de SDR.²

Explicado a detalle la sección de RF – también llamada RF Front – End – es la responsable de transmitir / recibir las señales de radio frecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencias intermedias – en el caso de la recepción – o amplificar y modular las señales de IF (Frecuencia Intermedia) adecuándolas para la transmisión en el aire – en el caso de la transmisión. [2]

La sección de IF es la encargada de pasar la señal de IF a banda base y digitalizarla, en el caso de la recepción o pasar la señal de banda base a IF y realizar la conversión digital – analógica de la señal, en el caso de la transmisión. Las encargadas de la conversión analógica – digital y viceversa de la señal son los módulos ADC/DAC. Los módulos DDC/DUC son los encargados de bajar digitalmente la señal de IF a banda base o subir de banda base a IF respectivamente. [2]

La sección banda base es la encargada de todo el procedimiento en banda base de la señal , como frecuencia hopping, establecimiento de sesión, ecualización, manejo de tiempos de bit, entre otros y en algunos casos de la implementación de protocolos del nivel de enlace del modelo OSI. En esta configuración de SDR los módulos DDC/DUC y la sección de banda base son los que realizan

² Elaboración propia

millones de instrucciones por segundo por eso es necesario, motivo por el cual normalmente son implementados en dispositivos de propósito general. [2]

Los protocolos o pila de protocolos en las capas superiores del modelo OSI permiten la comunicación y el entendimiento de la misma en una comunicación de datos. La comunicación de la capa física a nivel hardware, hasta la capa de aplicación (software) está directamente ligada y es imposible pasar de un nivel al otro sin requerir de servicios y funciones los cuales se encuentran dentro de las capas intermedias. Desde la creación y evolución constante de normas para 2.5G, 3G, existe una gran incompatibilidad entre tecnologías de redes inalámbricas utilizadas por diferentes países. Desde una perspectiva comercial y global, este problema inhibe el uso de servicios de roaming y otras facilidades por lo que esta es una de las grandes oportunidades de SDR (Radio Definido por Software), ya que el aspecto económico es de suma importancia, para la integración transparente de diversas arquitecturas de comunicación.

SDR es una tecnología de rápida evolución, que está recibiendo un gran reconocimiento e interés en el ámbito de las telecomunicaciones. En los últimos años los sistemas de radio analógicos están siendo sustituidos por sistemas de radio digital para diferentes aplicaciones.

2.2.1 SDR

El término “Radio Definido por Software” fue acuñado por Joe Mitola en 1991 para referirse a “radios” reconfigurables. Es decir, una misma pieza de hardware capaz de realizar diferentes funciones en diferente tiempo. De esta manera plantea el hecho de contar con un dispositivo de hardware de “propósito general” en el ámbito de comunicaciones. Este concepto ha logrado abrir un amplio panorama de oportunidades para la industria de las comunicaciones y la investigación en ese mismo sentido.

Existen diferentes conceptos del término SDR es por ello que sólo se hará mención a 3 de sus definiciones más importantes.

- SDR es una radio sustancialmente definida por software y cuyo comportamiento en la capa física del modelo OSI puede ser considerablemente alterado a través de cambios en su software.

- SDR es un término utilizado para describir software de control para una aplicación de radio el cual provee técnicas de modulación, operaciones de banda angosta y banda ancha, funciones de seguridad en comunicaciones y requerimientos de forma de onda.
- SDR es un sistema de comunicación por radio en donde los componentes que se han implementado por hardware (por ejemplo, mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores, detectores, etc.) ahora se implementarán utilizando software en una computadora u otros dispositivos. [2]

SDR es una tecnología creada para mejorar la interoperabilidad entre diferentes servicios. La tecnología SDR está compuesta de software y hardware, y puede ser reconfigurada dinámicamente para habilitar comunicaciones entre una amplia variedad de normas de comunicaciones, protocolos y radio enlaces. SDR permite crear dispositivos inalámbricos y equipo de redes multi-banda y multifuncionales, que pueden ser dinámicamente reconfigurados, o a través de actualizaciones de software y reconfiguraciones de hardware. [2]

2.2.2 Ventajas.

En la actualidad toda tecnología se encuentra en constante cambio por eso mismo se llegó a esta tecnología conocida como radio definida por software (SDR), algunas ventajas y aplicaciones de ésta son:

- **Interoperabilidad.** Un SDR puede actuar como puente de comunicación entre radios, o de igual manera puede establecer comunicaciones con múltiples radios aunque estos no sean compatibles. Esta característica fue una de las principales razones de interés de estos equipos que son utilizados hasta en las fuerzas armadas, esto porque es utilizado para establecer comunicación entre los batallones aunque los radios utilizados no sean compatibles. Es decir un SDR multi-canal puede actuar como un traductor para todos los tipos de radios.

- **Uso eficiente de los recursos en diferentes condiciones.** Un SDR puede adaptar la forma de las ondas para maximizar una métrica clave. Por ejemplo, puede seleccionar una forma de onda de baja potencia si la batería está agotándose. De igual manera puede seleccionar una forma de onda de alto rendimiento para realizar descargas rápidas. Es decir los SDRs se adaptan a los recursos que se tiene y a las actividades que se deben de realizar.
- **Reutilización de frecuencias (radio cognitiva).** Un SDR puede aprovechar el espectro infrutilizado. Si el propietario del espectro no lo utiliza, el SDR puede utilizar el espectro hasta que el propietario lo utilice. Con esta técnica se tiene el potencial de aumentar drásticamente la cantidad de espectro disponible.
- **Reducción de la obsolescencia.** Un SDR se puede actualizar para estar al día con los nuevos protocolos de comunicaciones. Esta capacidad es muy importante para las radios con largos ciclos de vida tales como para usos militares y aeroespaciales. Es decir de igual manera es una gran ventaja económica por que se adapta el software y no el hardware.
- **Codificación y modulación adaptable.** Algunos radios deben de minimizar el tamaño físico general, otros deben ofrecer la mayor fiabilidad posible, mientras que otras deben de operar en un entorno único como el subacuático. Para algunos, el objetivo es minimizar el consumo de energía mientras se mantiene el rendimiento requerido. La restricción de consumo de energía puede deberse a la limitada energía disponible en un dispositivo alimentado por batería o la disposición de calor para aplicaciones especiales. La cifra de mérito para estas radios es energía / bit. Otros radios no tienen limitaciones de potencia, pero deben transmitir la mayor cantidad de datos en el espectro disponible, en ese caso, la radio siempre transmite a la potencia más alta soportada. [2]

2.2.3 Desventajas.

Hasta ahora solo se ha manejado las grandes ventajas que se obtienen al manejar este tipo de radios para las comunicaciones, de igual manera existen desventajas como las que se describen a continuación:

- Costo y potencia. El argumento más común contra los SDR es el costo. Este argumento es particularmente importante para los productos de alto consumo y bajo margen. Un gran ejemplo, considere la posibilidad de un garaje que se abre a distancia, este dispositivo es extremadamente sencillo con una única función. Su diseño impide la añadir nuevas funcionalidades en el futuro. En cambio un chip SDR con la misma funcionalidad puede ser utilizado en otros dispositivos, pero el costo de un chip SDR es más elevado que un chip infrarrojo que son los que normalmente es utilizado.
- Consumo de energía. El segundo argumento más común contra el SDR es el aumento del consumo de energía. Dos fuentes que contribuyen a un mayor consumo de energía en un SDR: aumento de la complejidad DSP y mayor ancho de banda. [2]

2.2.4 Tipos de radios en el mercado.

2.2.4.1 National Instruments.

Según National Instruments, el radio definido por software ofrece una plataforma de diseño para generar prototipos rápidos de sistemas de comunicaciones inalámbricos, lo que lleva a una rápida obtención de resultados. Los ingenieros pueden presentar aplicaciones con señales del mundo real como banco de pruebas LTE / WiFi y MIMO.

El USRP más popular de National Instruments es el NI-USRP, este tiene como características principales:

- Transceptor de RF que se pueden afinar con opciones de frecuencia desde 50 MHz a 6 GHz.
- Hasta 20 MHz de ancho de banda en tiempo real con soporte MIMO plug-and-play.
- Opción para un receptor GPS integrado para mayor sincronización y precisión de frecuencia.
- Manuales prácticos de laboratorio listos para usar para cursos de RF y comunicaciones.
- 1 conexión Gigabit Ethernet a servidor.

El NI-USRP (Universal Software Radio Peripheral) es un dispositivo de radio flexible y rentable que convierte una PC estándar en una plataforma de generación de prototipos inalámbricos. Combinado con software NI LabVIEW, los transceptores NI USRP ofrecen un sistema potente para comenzar a trabajar rápidamente. [3]

2.2.4.2 WINRADIO.

WR-G315i / WR-G315e

Esta serie de receptores son también parte de la familia de equipos de radio que usan la tecnología SDR, este modelo cuenta con dos salidas de frecuencia intermedia (FI) una en 109.65 MHz y otra en 16 kHz.

Esta serie de receptores es para uso profesional por entidades del gobierno: policía, seguridad, fuerzas militares, vigilancia, etc. Pero también puede ser usado por la industria de broadcasting para aplicaciones de monitoreo de sus propias transmisiones.

El software que viene con el equipo incluye un analizador de espectro incorporado que permite ver secciones del espectro radial de hasta 20Khz a la vez. El software incorpora también demoduladores de varios tipos, como un demodulador de banda continua de FI de 1 Hz hasta 15 kHz y también los modos AM, AMS, LSB, USB, DSB, ISB, CW y FM. [4]

2.2.4.3 S&C Electric Company.

SpeedNet SDR.

Características.

- Transmisión confiable. El radio definido por software SpeedNet SDR está disponible en las bandas 400 MHz y 900 MHz con licencia. Ambas bandas admiten una radio de un solo canal y de doble canal. Estos Radios Definidos por Software optimizan parámetros en tres ejes: potencia de salida, tamaño del canal y modulación. Estos ofrecen un excelente rendimiento en el mercado comercial, su índice de radios por aire crea un ancho de banda que hace

posible la conectividad de Ethernet, lo que brinda un soporte más sencillo sobre la aplicación y la integración, incluso en aplicaciones de automatización emergentes.

- Módulo de segunda radio (opcional). En la misma carcasa, una segunda radio puede duplicar el ancho de banda o puede unirse a otra red de la misma banda o de una diferente para mejorar la funcionalidad de la repetidora en un plan de reutilización de la frecuencia.
- Interruptor Ethernet. Dos puertos Ethernet independientes vienen con soporte VLAN completo y se pueden configurar como puertos de acceso, puertos troncales o mixtos.
- Interruptor Ethernet. Dos puertos Ethernet independientes vienen con soporte VLAN completo y se pueden configurar como puertos de acceso, puertos troncales o mixtos.
- Potencia de salida programable. El Radio SpeedNet SDR de 400 MHz admite una potencia de salida de 100 mW a 2 W (+20 dBm a +33 dBm), y el Radio SpeedNet SDR de 900 MHz admite una potencia de salida de 100 mW a 3 W (+20 dBm a +35 dBm).
- Modulación ajustable. Los Radios SpeedNet SDR admiten índices variables de transferencia de datos. Se admiten hasta dos canales con los Radios SpeedNet SDR 4×4 de dos canales y SpeedNet SDR 9×9.

Protocolo de enrutamiento mallado. Los Radios SpeedNet SDR admiten el enrutamiento mallado automático, que elimina las fallas de red en puntos aislados. [5]

2.3 Sistemas de comunicaciones inalámbricas.

2.3.1 Radio digital

Los sistemas de microondas o de radio transmisión son sistemas de gran ancho de banda que sirven para transmitir a larga distancia altos volúmenes de información. Fundamentalmente, estos sistemas han sido analógicos, pero la intención es digitalizarlos para que puedan beneficiarse de las cualidades superiores de la transmisión digital, la propiedad que distingue a un sistema de radio digital de un sistema de radio convencional de AM o FM consiste en que en el sistema de radio digital las señales moduladora y demoduladora son pulsos digitales en lugar de forma analógica de onda. El radio digital emplea portadoras analógicas tal como lo hacen los sistemas convencionales, en esencia existen tres técnicas de modulación digital que se emplean en los sistemas de radio digital, estas son: la modulación por desviación de frecuencia (FSK), la modulación por desviación de fase (PSK), y la modulación de amplitud en cuadratura (QAM). [6, p. 120]

2.3.2 Modulación por desviación de frecuencia (FSK).

La FSK es una técnica de modulación digital simple, puede considerarse como una forma de modulación en ángulo con envolvente constante, similar a la modulación en frecuencia convencional con la diferencia de que la moduladora es un tren de pulsos binarios con amplitud que varía entre dos niveles discretos de voltaje, en lugar de una forma de onda con variación continua. Así, la expresión general para la señal FSK binaria es:

$$m(t) = A_c \cos \left[\left(\omega_c + \frac{s_m(t)\Delta\omega}{2} \right) t \right]$$

En donde:

$m(t)$ = onda FSK binaria

A_c = amplitud pico de la portadora sin modular

ω_c = frecuencia en radianes/seg de la portadora

$s_m(t)$ = señal modulante digital binaria

$\Delta\omega$ = cambio de frecuencia en la salida.

Como puede verse en esta ecuación, en FSK binario la amplitud A_c de la portadora se mantiene constante con la modulación pero la frecuencia ω_c de la portadora cambia en la cantidad $\pm\Delta\omega/2$. Este cambio de frecuencia es proporcional a la amplitud y polaridad de la moduladora binaria. Por ejemplo si el uno binario es +1 volt y el cero binario es -1 volt se producen los cambios de frecuencia de $+\Delta\omega/2$ y $-\Delta\omega/2$, respectivamente. Además, la rapidez o velocidad a la que cambia la frecuencia de la portadora es igual a la velocidad de cambio de la señal binaria de entrada $s_m(t)$ (o sea, la tasa de bits de entrada). En consecuencia, la frecuencia de la portadora de salida cambia entre $\omega_c + \Delta\omega/2$ y $\omega_c - \Delta\omega/2$ a la velocidad de f_b . [6, p. 121]

2.3.2.1 Transmisor FSK.

Como se ha visto, en el FSK binario la frecuencia de la portadora se desvía en función de los datos binarios de entrada. Por lo tanto, la salida de un modulador FSK es una función escalón en el tiempo. A medida que la señal de entrada cambia de lógico 0 a lógico 1 y viceversa, la salida de FSK cambia entre dos frecuencias: la marca f_m (lógico 1) y la de espacio f_e (lógico 0). Cada vez que la condición lógica de la señal binaria de entrada cambia, existe un cambio en la frecuencia de salida de la señal FSK. [6, p. 121]

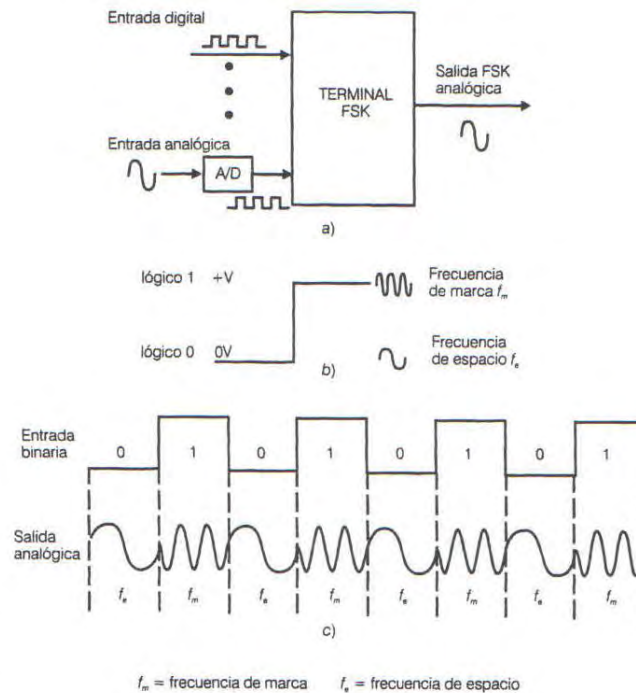


Ilustración 5: Transmisor FSK binario.³

En consecuencia, la velocidad de cambio de la salida es igual a la velocidad de cambio de la entrada. La velocidad de cambio de la entrada del modulador se conoce como velocidad de bits y se mide en bits por segundo. La velocidad de cambio a la salida del modulador se conoce como velocidad de bauds y es igual al recíproco de la duración de un elemento de señalización de salida. Básicamente, el baud es la tasa de línea en 15 símbolos por segundos. En FSK binario, las velocidades de cambio en la entrada y la salida son iguales; por lo tanto, la velocidad de bits y de bauds son iguales. La ilustración 4a ilustra el transmisor FSK binario simple, la ilustración 4c muestra la relación entre la señal digital de entrada y la salida FSK analógica. [6, p. 122]

2.3.2.2 Ancho de banda en FSK.

Con frecuencia, la FSK se genera con un oscilador controlado por voltaje (OCV) como se muestra en la siguiente figura. Con una entrada binaria como la que se emplea, la mayor velocidad de cambio en la entrada se tiene cuando la entrada está constituida por 1's y 0's consecutivamente alternos, es decir un tren periódico de pulsos.

³ [6]

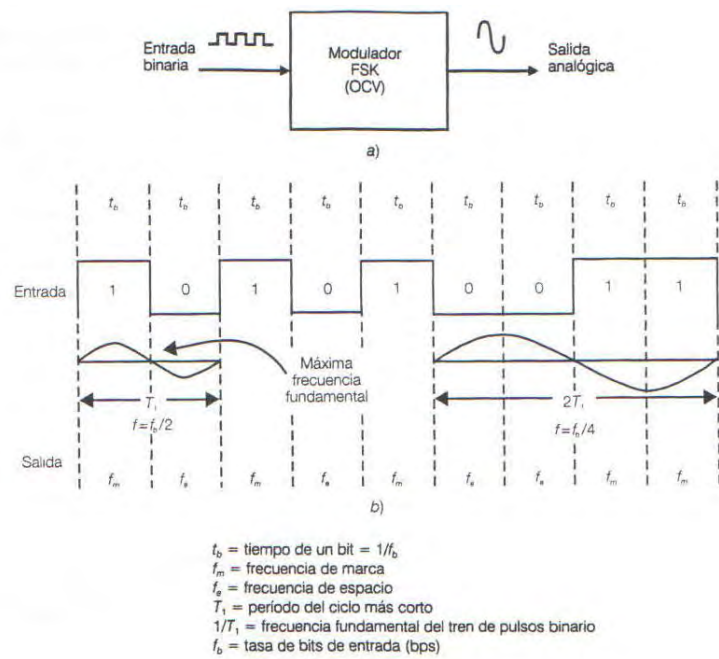


Ilustración 6: Modulador FSK a base de OCV.⁴

Como la frecuencia fundamental de este tren periódico de pulsos es la mitad de su tasa de bits, considerando solo la frecuencia fundamental de la entrada, la máxima frecuencia demoduladora para el modulador FSK es igual a la mitad de la tasa de bits de entrada.

Con el valor de frecuencia de reposo del OCV a la mitad entre las frecuencias de marca y espacio, el 1 lógico en la entrada cambia al OCV de su frecuencia de reposo a la frecuencia de marca f_m y el 0 lógico en la entrada cambia al OCV de su frecuencia de reposo a la frecuencia de espacio (f_e). En consecuencia, a medida que la señal de entrada cambia de 1 lógico a 0 lógico y viceversa, la frecuencia de salida del OCV se desvía alternadamente entre f_m y f_e . El índice de modulación (IM) para FSK, que es una forma de modulación en frecuencia, es el que se emplea para FM y está dado por

$$IM = \frac{\Delta f}{f_a}$$

Siendo Δf la desviación de la frecuencia en Hz y f_a la frecuencia moduladora en Hz.

⁴ [6]

El IM del peor caso es el índice de modulación que produce la salida con ancho de banda más grande. Este caso ocurre cuando tanto la desviación de frecuencia como la moduladora tienen sus valores máximos. [6, p. 123]

En el modulador FSK, Δf es la desviación de frecuencia pico de la portadora y es igual a la diferencia entre la frecuencia de reposo y cualquiera de f_m o f_e (o la mitad de la diferencia entre f_m y f_e). Δf depende de la amplitud de la moduladora. En una señal digital binaria todos los unos lógicos tienen el mismo voltaje y todos los ceros lógicos tienen el mismo voltaje; consecutivamente, la desviación de frecuencia es constante y siempre está en su máximo valor. f_a Es igual a la frecuencia fundamental de la entrada binaria la cual, bajo la condición del peor caso (unos y ceros alternos) es igual a la mitad de la tasa de bits (f_b). En consecuencia, para FSK binario

$$IM = \frac{\left| \frac{f_m - f_e}{2} \right|}{\frac{f_b}{2}} = \frac{|f_m - f_e|}{f_b}$$

Siendo $\left| \frac{f_m - f_e}{2} \right|$ la desviación de frecuencia pico, f_b la tasa de bits de entrada y $f_b/2$ la frecuencia fundamental de la moduladora binaria.

Toda vez que en la FM de banda angosta convencional el ancho de banda es directamente proporcional al índice de modulación, en FSK el IM se mantiene generalmente bajo (menor a 1), produciendo un espectro de FM de salida con ancho de banda relativamente angosto. [6, p. 124]

2.3.2.3- Receptor FSK.

El circuito más común para la demodulación de señales FSK es el circuito de fase fija (PLL) que se ilustra en la siguiente ilustración. El demodulador PLL – FSK opera de manera muy similar al demodulador PLL-FM. A medida que la entrada del PLL cambia entre f_m y f_e , el voltaje de error de cd de salida del comparador de fase cambia en concordancia. Como solo existen dos frecuencias de entrada (f_m y f_e) solo existen dos voltajes de error de salida, uno representa al 1 lógico y otro al 0 lógico. Así, la salida es la representación de dos niveles (binaria) de la entrada FSK. Por lo general, la frecuencia natural del PLL se hace igual a la frecuencia central del

modulador FSK. Como resultado, los cambios en el voltaje de error de cd siguen a los cambios de frecuencia en la entrada analógica y son simétricos con respecto a 0 V. [6, p. 124]

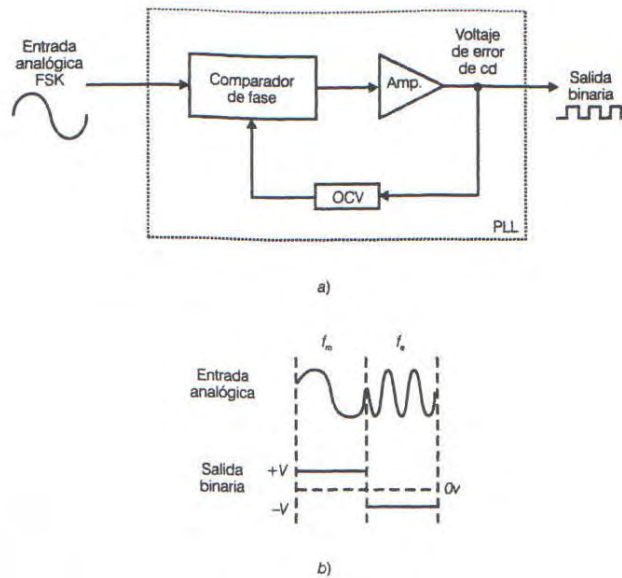


Ilustración 7: Demodulador de FSK.⁵

FSK presenta un comportamiento de error más pobre que PSK y QAM, por lo que su empleo en los sistemas de radio digital de alto desempeño es muy incipiente. Su utilización se restringe a los módems de datos síncronos de costo y desempeño bajos que se emplean para la comunicación de datos sobre líneas telefónicas en banda de voz. [6, p. 125]

2.3.3- Modulación por desviación de fase (PSK).

La modulación por desviación de fase (PSK) es otra forma de modulación en ángulo de envolvente constante. PSK es similar a la modulación de fase convencional con la salvedad de que en PSK la señal de entrada es una señal digital binaria y es posible determinado número limitado de fases de salida. [6, p. 127]

⁵ [6]

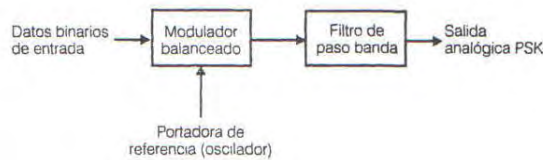


Ilustración 8: Modulador BPSK.⁶

2.3.4- Modulación por desviación de fase binaria (BPSK).

En la modulación por desviación de fase binaria (BPSK) son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora. Una fase de salida representa al 1 lógico y la otra al 0 lógico. A medida que la señal digital de entrada cambia, la fase de la portadora de salida cambia entre dos ángulos que están 180° fuera de fase. La BPSK también se conoce como modulación por inversión de fase (PRK) o modulación bifásica. [6, p. 128]

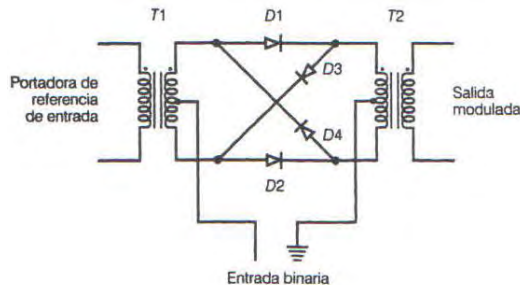


Ilustración 9: Modulador balanceado.

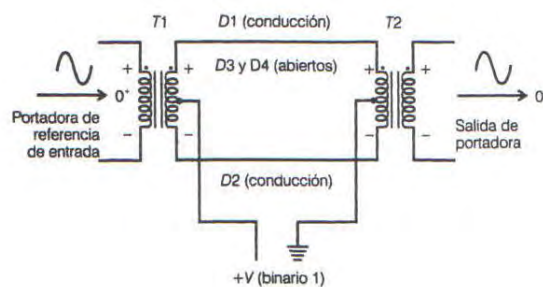


Ilustración 10: Entrada en 1 lógico.⁷

⁶ [6]

⁷ [6]

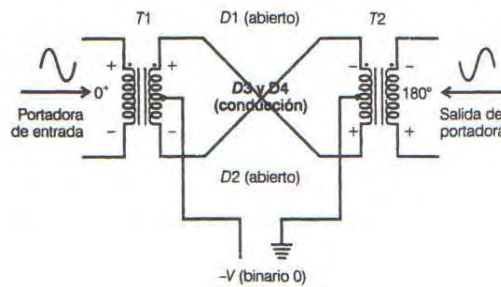


Ilustración 11: Entrada en 0 lógico.⁸

2.3.4.1- Transmisor de BPSK.

La BPSK se puede generar con un modulador balanceado seguido de un filtro paso banda como se ilustra en la ilustración anterior. El modulador balanceado actúa como interruptor de inversión de fase. Dependiendo de la condición lógica de la entrada digital, la portadora se transfiere a la salida, ya sea fase o 180° fuera de fase con respecto a la portadora del oscilador de referencia. La ilustración 9 muestra el diagrama del modulador balanceado de anillo. Este tiene dos entradas, por una se aplica la portadora que está en fase con el oscilador de referencia y por la otra los datos digitales binarios. Para que el modulador opere adecuadamente el voltaje digital de entrada debe de ser mucho mayor que el voltaje pico de la portadora. Esto asegura que la entrada digital controle el estado prendido/apagado de los diodos D1-D4. Si la entrada binaria es lógico 1, los diodos D1 y D2 se polarizan directamente y conducen, en tanto que los diodos D3 y D4 se polarizan inversamente ilustración 10. Con las polaridades que se muestran, el voltaje de portadora a través de T1.

En consecuencia, la señal de salida está en fase con el oscilador de referencia. Si la entrada binaria es lógico 0, los diodos D1 y D2 se polarizan inversamente y cortan, en tanto que los diodos D3 y D4 se polarizan directamente y conducen ilustración 11. Como resultado, el voltaje de portadora aparece a través del transformador T2 180° fuera de fase con respecto al voltaje de portadora a través de T1. En consecuencia, la señal de salida está 180° fuera de fase con relación al oscilador de referencia. El diagrama de constelación, que algunas veces que algunas veces se le llama

⁸ [6]

diagrama de estado-espacio señal, es similar al diagrama fasorial, excepto que el fasor completo no se dibuja. En el diagrama de constelación, solo se muestran las posiciones relativas de los picos de los factores. [6, p. 128]

2.3.4.2- Ancho de banda en BPSK.

El modulador balanceado es un modulador de multiplicación. La señal de salida es el producto de las dos señales de entrada. En un modulador BPSK la portadora de entrada se multiplica por los datos binarios. Si al lógico 1 se le asigna +1 volt y al lógico 0 se le asigna -1 volt, la portadora de entrada $\sin \omega_c t$, se multiplica ya sea por +1 o por -1. En consecuencia, la señal de salida es

$$+1 \sin \omega_c t \quad \text{o} \quad -1 \sin \omega_c t$$

La primera representa una señal que está en fase con el oscilador de referencia, la segunda es una señal que está 180° fuera de fase con respecto al oscilador de referencia. Cada vez que la condición lógica de entrada cambia, la fase de salida cambia. En consecuencia, para BPSK, la velocidad de cambio de la salida es igual a la velocidad de cambio de la entrada, y el ancho de banda más grande de salida ocurre cuando los datos binarios de entrada son la secuencia alterna 1/0. [6, p. 130]

La frecuencia fundamental (f_a) de una secuencia alterna de bits 1/0 es igual a la mitad de la tasa de bits ($f_b/2$). Matemáticamente la salida de un modulador BPSK es:

$$\begin{aligned} \text{Salida} &= \sin \omega_a t \quad x \quad \sin \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} \cos(\omega_c t - \omega_a t) - \frac{1}{2} \cos(\omega_c t + \omega_a t) \end{aligned}$$

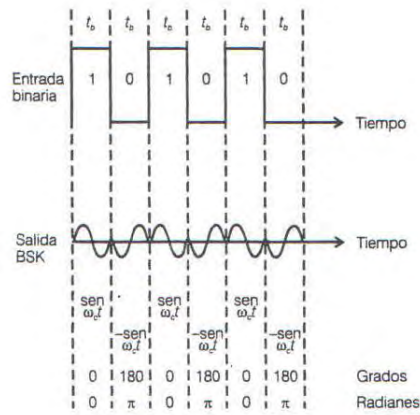


Ilustración 12: Relación de la fase de salida contra tiempo para un modulador BPSK.⁹

Consecuentemente, el ancho de banda mínimo de Nyquist de doble banda lateral (f_N) es

$$\omega_N = (\omega_c + \omega_a) - (\omega_c - \omega_a) = 2\omega_a$$

Y debido a que $f_a = f_b/2$

$$f_N = 2\left(\frac{f_b}{2}\right) = f_b$$

La ilustración 12 muestra la relación fase – tiempo de una forma de onda BPSK. El espectro de salida de un modulador BPSK es el de una señal de doble banda lateral con portadora suprimida en el que las frecuencias laterales superiores e inferiores están separadas de la frecuencia portadora por un valor igual a la mitad de la razón de bits. En consecuencia, el mínimo ancho de banda (f_N) requerido, para permitir el peor caso de la señal de salida del BPSK, es igual a la razón de bits de entrada. [6, p. 132]

2.3.4.3- Receptor BPSK.

El modulador balanceado también constituye la base del receptor de BPSK como se muestra en la figura 12 que ilustra el diagrama a bloques de este receptor. La señal de entrada puede ser $+\sin \omega_c t$ o $-\sin \omega_c t$.

⁹ [6]

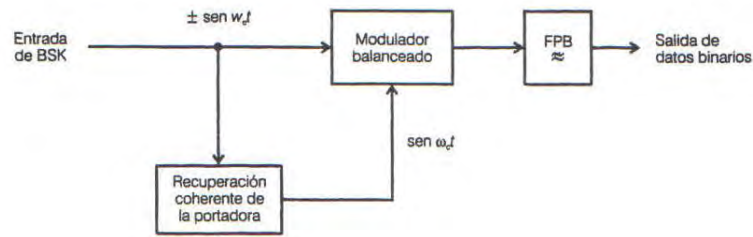


Ilustración 13: Receptor BPSK.¹⁰

El circuito de recuperación coherente de portadora detecta y regenera una señal de portadora que es igual, tanto en frecuencia como en fase, a la portadora de transmisor. El modulador balanceado es un detector de multiplicación, la salida es el producto de las dos entradas (la señal BPSK y la portadora recuperada). El filtro de paso bajo (FPB) separa los datos binarios recuperados de la señal desmodulada compleja. Matemáticamente, el proceso de demodulación es como sigue. Para la señal de entrada BPSK de $+ \sin \omega_c t$ (1 lógico), la salida del demodulador balanceado es

$$\begin{aligned} salida &= (\sin \omega_c t)(\sin \omega_c t) = \sin^2 \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} - (1/2) \cos 2\omega_c t \end{aligned}$$

Eliminando por filtraje el término $(1/2) \cos 2\omega_c t$ se obtiene

$$salida = +\frac{1}{2} V = 1 \text{ logico}$$

Como se observa, la salida del modulador balanceado contiene un voltaje positivo y una onda coseno de doble frecuencia de portadora $2\omega_c$. El FPB tiene una frecuencia de corte mucho más baja que $2\omega_c$ y, en consecuencia, bloquea esta segunda armónica de la portadora pasando solo la componente constante positiva. El voltaje positivo representa un 1 lógico desmodulado.

Para la señal de entrada BPSK de $-\sin \omega_c t$ (0 lógico), la salida del modulador balanceado es

$$salida = (-\sin \omega_c t)(\sin \omega_c t) = -\sin^2 \omega_c t$$

¹⁰ [6]

$$= -\frac{1}{2}(1/2) \cos 2\omega_c t$$

Eliminando por filtraje el término $(1/2) \cos 2\omega_c t$ se obtiene

$$salida = -\frac{1}{2} V = 0 \text{ logico}$$

De nuevo, la salida del modulador balanceado contiene un voltaje negativo $-\frac{1}{2} V$ y una onda coseno de doble frecuencia de portadora $2\omega_c$. El FPB bloquea la segunda armónica de la portadora y solo deja pasar la componente constante negativa. El voltaje negativo representa un 0 lógico desmodulado. [6, p. 133]

2.3.5- Modulación por desviación de fase cuaternaria (QPSK).

La modulación por desviación de fase cuaternaria (QPSK), o PSK en cuadratura como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital tipo modulación angular de amplitud constante. Con QPSK son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Ya que la entrada digital a un modulador QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones 00, 01, 10 y 11. En consecuencia, con QPSK los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados dibits. Cada código dibit genera una de las cuatro fases de salida posibles. Por tanto, por cada dibit de 2 bits introducidos al modulador ocurre un solo cambio de salida. En consecuencia, la tasa de cambio de salida es la mitad de la tasa de bits de entrada. [6, p. 134]

2.3.5.1- Transmisor QPSK.

En la ilustración 14 se muestra el diagrama a bloques de un modulador QPSK. A la entrada se inyectan al divisor de dos bits en serie, obteniéndose a la salida ambos bits en paralelo

simultáneamente. Un bit se dirige al canal I y otro al canal Q. el bit I modula a una portadora que está en fase con el oscilador de referencia y el bit Q modula a una portadora que está a 90° fuera de fase o en cuadratura con la portadora de referencia. Puede observarse que una vez separado un dibit en los canales I y Q, la operación es idéntica a la del modulador BPSK. En esencia un modulador QPSK son dos moduladores BPSK combinados en paralelo.

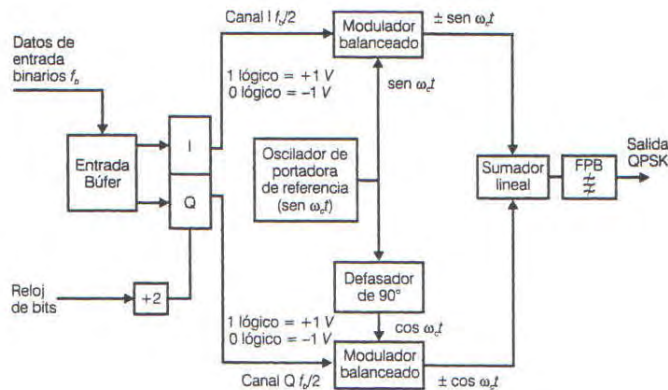


Ilustración 14: Modulador QPSK.¹¹

2.3.5.2- Ancho de banda para QPSK.

Como en QPSK los datos de entrada se dividen en dos canales, la tasa de bits en el canal I, o en el canal Q, es igual a la mitad de la tasa de datos de entrada ($f_b/2$). Es esencia, el divisor de bits estira los bits, I y Q, al doble de la longitud de los bits de entrada. En consecuencia, la frecuencia fundamental más alta presente en la entrada de datos al modular balanceado, I o Q, es igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada. Como resultado, la salida de los moduladores balanceados I y Q requiere de un mínimo ancho de Nyquist de doble banda lateral, igual a la mitad de la tasa de bits de entrada. Por tanto, con QPSK se realiza una compresión de ancho de banda. Además, ya que la señal de salida QPSK no cambia de fase, hasta que 2 bits (un dibit) se introducen al divisor de bits, la tasa de cambio más rápida de salida (baud) es igual a la mitad de la tasa de bits de entrada. Así, como con BPSK, el mínimo ancho de banda y los baud son iguales. Un ciclo de la transición binaria más rápida (una secuencia 1/0) en el canal I o Q toma el mismo tiempo que 4

¹¹ [6]

bits de datos de entrada. En consecuencia, la frecuencia fundamental más alta a la entrada y la razón de cambio más rápida a la salida de los moduladores balanceados es igual a un cuarto de la tasa de bits de entrada binaria. [6, p. 136]

La salida de los moduladores balanceados se pueden expresar matemáticamente como:

$$salida = (\sin \omega_a t)(\sin \omega_c t)$$

Donde:

$$\omega_a t = 2\pi \frac{f_b}{4} t \quad \text{fase modulada}$$

$$\omega_c t = 2\pi f_c t \quad \text{fase de la portadora demodulada}$$

En consecuencia

$$\begin{aligned} salida &= \sin(2\pi f_b/4)t \sin 2\pi f_c t \\ &= (1/2) \cos 2\pi \left(f_c - \frac{f_b}{4} \right) t - (1/2) \cos 2\pi \left(f_c + \frac{f_b}{4} \right) t \end{aligned}$$

El espectro de salida se extiende desde $f_c + f_b/4$ a $f_c - f_b/4$ y el ancho de banda mínimo (f_N) es

$$\left(f_c + \frac{f_b}{4} \right) - \left(f_c - \frac{f_b}{4} \right) = \frac{2f_b}{4} = f_b/2$$

2.3.5.3- Receptor QPSK.

El diagrama a bloques de un receptor QPSK se muestra en la ilustración 15. El divisor de potencia envía la señal QPSK de entrada a los detectores de producto I y Q y al circuito de recuperación de portadora. El circuito de recuperación de portadora reproduce la señal original del oscilador de portadora de transmisión. La portadora recuperada tiene que ser coherente (idéntica), en frecuencia y fase, con la portadora de referencia transmisora. La señal QPSK se modula de los detectores de producto I y Q que generan los bits de datos I y Q originales. Las salidas de los

detectores de producto se alimentan al circuito combinado de bits, donde se convierten de canales de datos I y Q paralelos a un solo flujo de datos de salida binarios. [6, p. 139]

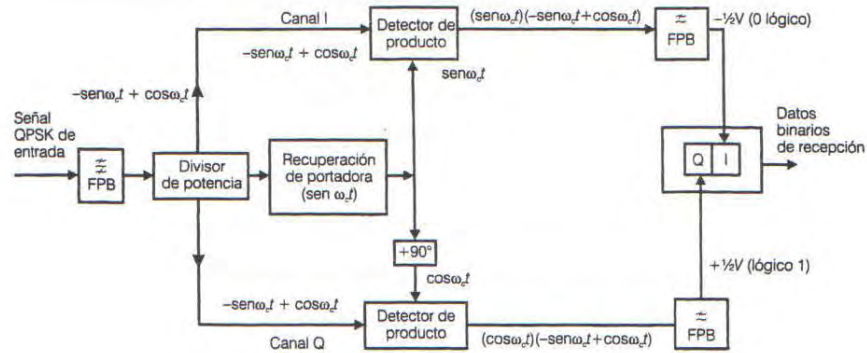


Ilustración 15: Receptor de QPSK.¹²

Para ilustrar el proceso de demodulación consideremos que la señal QPSK de entrada es $-\sin \omega_c t + \cos \omega_c t$. Matemáticamente, el proceso de demodulación es como sigue. La señal QPSK ($-\sin \omega_c t + \cos \omega_c t$) es una de las entradas al detector de producto I. La otra entrada es la portadora recuperada $\sin \omega_c t$. La salida del detector de producto I es

$$\begin{aligned}
 I &= (-\sin \omega_c t + \cos \omega_c t)(\sin \omega_c t) \\
 &= -\sin \omega_c t \sin \omega_c t + \cos \omega_c t \sin \omega_c t \\
 &= \sin^2 \omega_c t + \cos \omega_c t \sin \omega_c t \\
 &= -\left(\frac{1}{2}\right)(1 - \cos 2\omega_c t) + (1/2) \sin(\omega_c + \omega_c)t + (1/2) \sin(\omega_c - \omega_c)t \\
 I &= -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2}\right) (\cos 2\omega_c t) + \left(\frac{1}{2}\right) \sin \omega_c t + (1/2) \sin 0
 \end{aligned}$$

Por filtraje, los términos de frecuencia $2\omega_c$ se eliminan, quedando

$$I = -\left(\frac{1}{2}\right)V \text{ (0 logico)}$$

¹² [6]

De nuevo, la señal QPSK de entrada $(-\sin \omega_c t + \cos \omega_c t)$ es una de las entradas al detector de producto Q. la otra entrada es la portadora recuperada cambiada 90° en fase $(\cos \omega_c t)$. La salida del detector de producto Q es

$$\begin{aligned} Q &= (-\sin \omega_c t + \cos \omega_c t)(\cos \omega_c t) \\ &= \cos^2 \omega_c t - \sin \omega_c t \cos \omega_c t \\ Q &= -\left(\frac{1}{2}\right)(1 + \cos 2\omega_c t) - \left(\frac{1}{2}\right)\sin(\omega_c + \omega_c)t - (1/2)\sin(\omega_c - \omega_c)t \\ Q &= \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\cos 2\omega_c t - \left(\frac{1}{2}\right)\sin 2\omega_c t - (1/2)\sin 0 \end{aligned}$$

Por filtraje, los términos de frecuencia $2\omega_c$ se eliminan. Por lo tanto

$$Q = \left(\frac{1}{2}\right)V/(1 \text{ logico})$$

Los bits I y Q desmodulados (0 y 1, respectivamente) corresponden al diagrama de constelación y tabla de verdad del modulador QPSK que se muestra en la ilustración 14. [6, p. 140]

2.3.6- PSK de ocho fases (8-PSK).

El PSK de ocho fases (8-PSK) es posible tener ocho fases de salida. Para codificar ocho fases diferentes, los bits de entrada se consideran en grupos de 3 bits, llamados tribits ($2^3 = 8$). [6, p. 141]

2.3.6.1- Transmisor PSK de ocho fases.

El diagrama de bloques de un modulador 8-PSK se muestra en la ilustración 16. El tren serie de bits de entrada introduce al divisor de bits, en donde se convierte a una salida paralela de tres canales (el canal I, o en fase; el canal Q, o en cuadratura y el canal C, o de control). En consecuencia, la tasa de bits en cada uno de los tres canales es $f_b/3$. Los bits en los canales I y C entran al conversor de los niveles 2 a 4 del canal I y los bits de los canales Q y C entran al conversor de los niveles 2 a 4 son conversores digital a analógico de entrada paralela. Con 2 bits de entrada,

son posibles cuatro voltajes de salida. El bit I o Q determina la polaridad de la señal analógica de salida (1 lógico = + V y 0 lógico = -V), mientras que el bit C o C determina la magnitud (1 lógico = 1.307 V y 0 lógico = 0.541V). En consecuencia, con dos magnitudes y dos polaridades, son posibles cuatro condiciones de salida diferente. [6, p. 141]

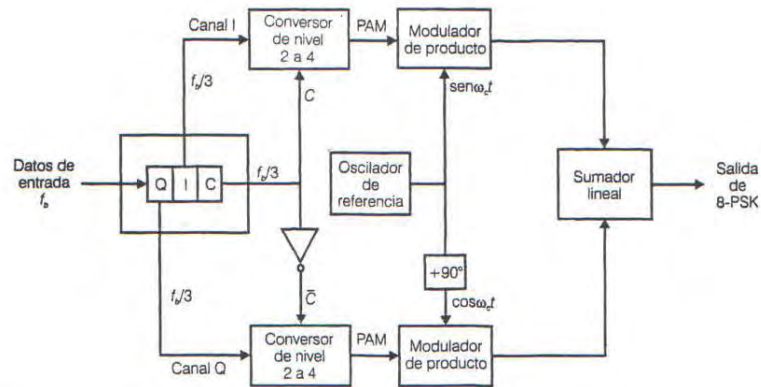


Ilustración 16: Modulador 8-PSK.¹³

2.3.6.2- Ancho de banda en 8-PSK.

Ya que en 8-PSK los datos se dividen en tres canales, la tasa de bits en el canal I, Q o C es igual a un tercio de la tasa de datos de entrada binaria ($f_b/3$). Debido a que los bits I, Q y C, tiene una salida simultánea y en paralelo, los convertidores de niveles de 2 a 4, también ven un cambio en sus entradas a una tasa igual a $f_b/3$. [6, p. 144]

2.3.6.3- Receptor 8-PSK.

La ilustración 17 muestra el diagrama a bloques de un receptor 8-PSK. El divisor de potencia dirige la señal 8-PSK de entrada a los detectores de producto I y Q y al circuito de recuperación portadora. El circuito de recuperación de portadora reproduce la señal original del oscilador de referencia. La señal 8-PSK que está entrando se mezcla con la portadora recuperada en el detector de producto I y con una portadora en cuadratura en el detector de producto Q. la salida de los detectores de

¹³ [6]

producto son señales PAM, de nivel 4, que alimentan a los convertidores analógico al digital (ADC) mientras que las salidas del convertidor de nivel 4 a 2, canal I, son los bits Q y C. El circuito lógico de paralelo a serie convierte los pares a bit, I/C y Q/C, a flujos de datos de salida serie I, Q y C. [6, p. 147]

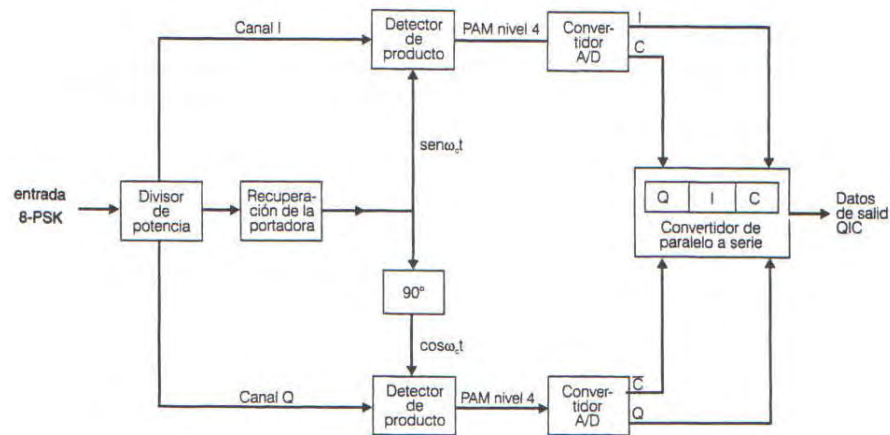


Ilustración 17: Receptor 8-PSK.¹⁴

2.3.7- Modulación por amplitud en cuadratura.

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora que se transmite. [6, p. 147]

2.3.8- QAM de ocho (8-QAM).

La ilustración 18 muestra el diagrama a bloques de un transmisor 8-QAM. Los datos que entran se dividen en grupos de tres bits: los flujos de bits I, Q y C, cada uno con tasa de bits igual a un tercio de la tasa de datos que están entrando. Nuevamente, los convertidores de nivel 2 a 4, y el canal C determina la magnitud. Debido a que el bit C se alimenta sin invertir a los convertidores del nivel 2 a 4 canal I/Q, las magnitudes de las señales PAM, I/Q, siempre son iguales. Sus polaridades

¹⁴ [6]

dependen de la condición lógica de los bits I/Q y, por consiguiente, pueden ser diferentes. [6, p. 148]

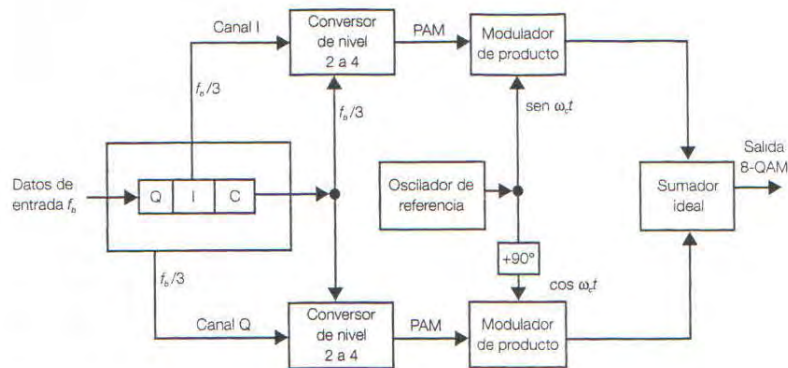


Ilustración 18: Diagrama a bloques de un transmisor de 8-QAM.¹⁵

2.3.8.2- Ancho de banda para el QAM de ocho.

En el 8-QAM, la tasa de bits en los canales I y Q es un tercio de la tasa binaria de entrada, al igual que el 8-PSK. Como resultado, la frecuencia de modulación fundamental más alta y la razón de cambio de salida más rápida en 8-QAM son iguales que en 8-PSK. Por tanto, el mínimo ancho de banda requerido para 8-QAM es también $f_b/3$. [6, p. 150]

2.3.8.3- Receptor QAM de ocho.

El receptor de 8-QAM es casi idéntico al receptor 8-PSK. La diferencia son los niveles PAM, en la salida de los detectores de producto y las señales binarias a la salida de los convertidores analógico al digital. Debido a que hay dos amplitudes de transmisión posibles, con 8-QAM que son diferentes de aquellas factibles con 8-PSK, los cuatro niveles PAM desmodulados son diferentes de aquellos en 8-PSK. En consecuencia, el factor de conversión para los convertidores analógico al digital, también tiene que ser diferente. Además, con 8-QAM las señales de salida binarias del convertidor analógico al digital, del canal I son los bits I y C, y las señales de salida binarias del convertidor analógico al digital, de canal Q, son los bits Q y C. [6, p. 151]

¹⁵ [6]

Tabla de estándares IEEE 802.11p.

Los estándares presentados en la siguiente tabla son los que se manejan en la capa física para comunicaciones entre vehículos (V2V, vehicle to vehicle). [7]

Modulation Type	BPSK		QPSK		16-QAM		64-QAM	
	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Coding Rate	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Coded bit rate in Mbps	6		12		24		36	
Data Rate in Mbps	3	4.5	6	9	12	18	24	27
Data bits per OFDM symbol	24	36	48	72	96	144	192	216

Capítulo 3 Desarrollo

3.1 USRP.

Este es un SDR que transforma una computadora estándar en una plataforma de generación de prototipos importantes. Los equipos NI USRP combinados con el software NI LabVIEW, ofrecen una plataforma potente que facilita la acción de creación de prototipos de sistemas inalámbricos de radio frecuencia.

La combinación de este hardware con el software adecuado, llegan hacer posible la obtención de experiencia práctica explorando los sistemas de comunicaciones. [8]

3.1.1 NI USRP-2920.

Este dispositivo que se muestra en la ilustración 19 permite el procesamiento de señales de radiofrecuencia que oscilan entre los 50Mhz y los 2.2 GHz, complementado por el uso de un sistema computacional en la mayoría de las ocasiones. [9]



Ilustración 19: NI USRP-2920.¹⁶

¹⁶ [3]

3.1.1.1 Estructura interna del Hardware NI USRP-2920.

Este puede configurarse ya se de modo transmisión o recepción, o a su vez puede funcionar como los dos modos al mismo tiempo, en base de cómo se necesario. En la siguiente ilustración 20 se puede observar la estructura interna del NI USRP-2920, la cual tiene 5 etapas, en la parte superior se encuentra la etapa central de transmisión, mientras que en la parte inferior se encuentra el segmento de recepción, en la derecha se encuentra la interfaz de conexión Ethernet, en la parte superior izquierda se encuentra la interfaz de Tx/Rx y en la inferior la interfaz de Rx. [10]

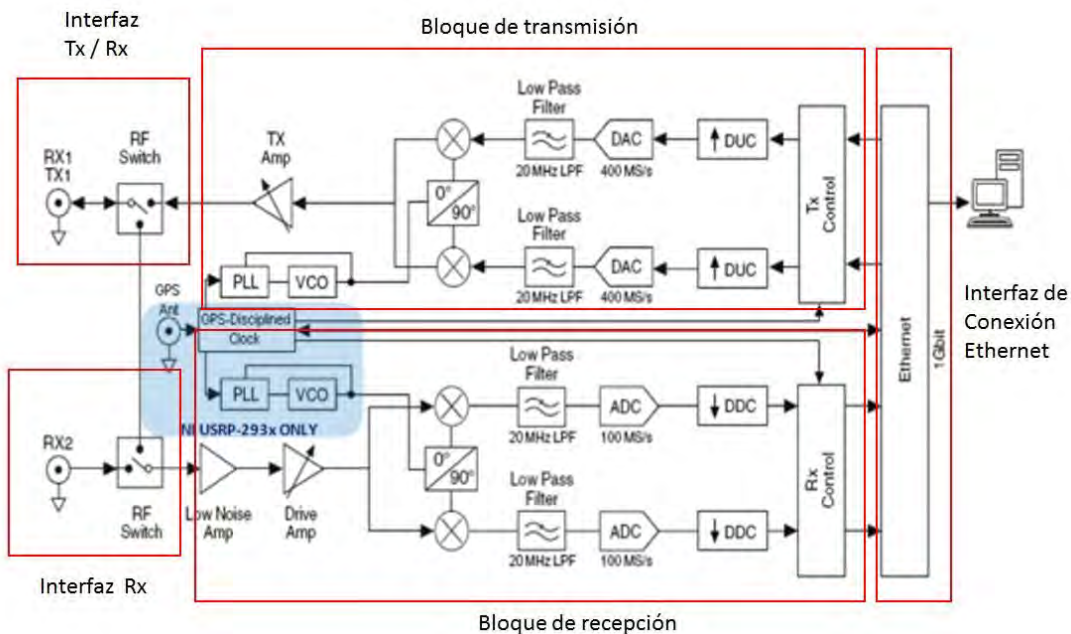


Ilustración 20: Estructura interna NI USRP-2920.¹⁷

3.1.1.2 Características de NI USRP-2920.

Dimensiones físicas.

- Alto: 4,826 cm.
- Ancho: 15,875 cm.
- Largo: 21,209 cm.

¹⁷ [8]

- Peso: 1,193 kg.

3.1.1.3 Interfaces del NI USRP-2920.

De la tarjeta madre principal salen diferentes puertos de comunicación, los cuales se muestran en el panel frontal del equipo, dichas interfaces son: [10]

- Interfaz de transmisión y recepción de RF primario (Tx1/Rx1).
- Interfaz de recepción RF secundario (Rx2).
- Entrada para señal de referencia externa.
- Entrada para señal de referencia de reloj.
- Expansión MIMO.
- Puerto RJ-45 Gigabit Ethernet.
- Entrada para alimentación de poder.
- Led's indicadores.

3.1.2 Configuración inicial NI USRP-2920.

Este equipo funciona mediante una tarjeta Gigabit Ethernet, y la conexión física entre el USRP y el equipo de cómputo es por medio de un cable UTP de categoría 5 o superior para que la conexión sea adecuada.

La conexión de USRP a equipo de cómputo se realiza por medio del protocolo TCP-IPv4, el USRP tiene la dirección IP 192.168.10.2 por defecto, por lo tanto, al momento de configurar la tarjeta de red Gigabit Ethernet, se le debe asignar una dirección IP que pertenezca a la misma red para lograr una conexión exitosa, la configuración se realiza en la ventana mostrada en la ilustración 21.

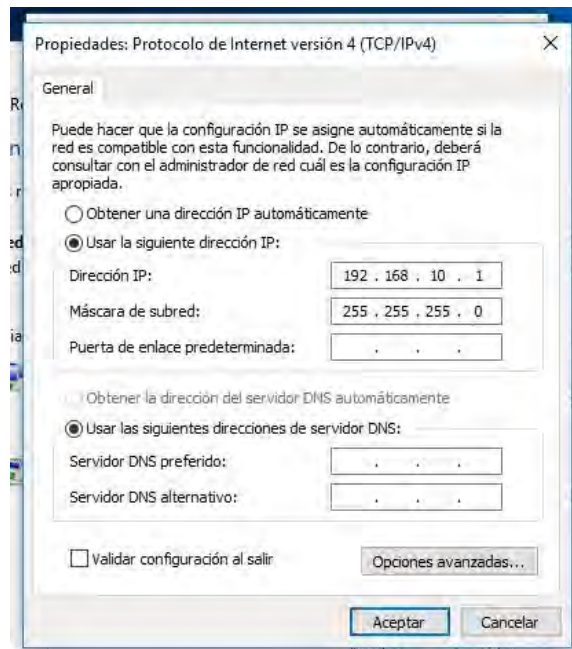


Ilustración 21: Configuración del adaptador de red.

3.1.2.1 Cambio de IP de USRP.

El USRP viene con una dirección 192.168.10.2 por defecto, pero de igual manera es posible cambiar dicha dirección dependiendo de las necesidades del usuario, esto se realiza por medio del software NI-USRP Configuration Utility que se instala con la paquetería de USRP y se muestra en la ilustración 22.

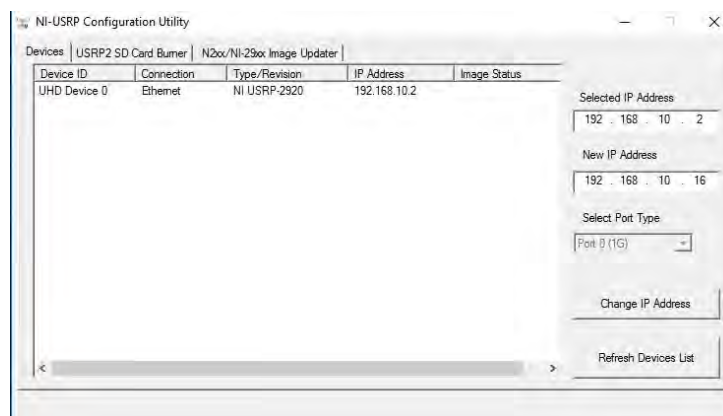


Ilustración 22: NI-USRP Configuration Utility.

3.2 Bloques principales para NI USRP-2920.

Anteriormente se mencionó a detalle las características de LabVIEW, entre esas características se menciona que por default LabVIEW trae la paquetería de USRP, ahora se realiza una descripción de los bloques principales para realizar un sistema de comunicaciones con los USRP. Los bloques principales se encuentran ubicados en Functions palette, select Instrument I/O >> Instrument Drivers >> NI-USRP, que se muestra en la ilustración 23.

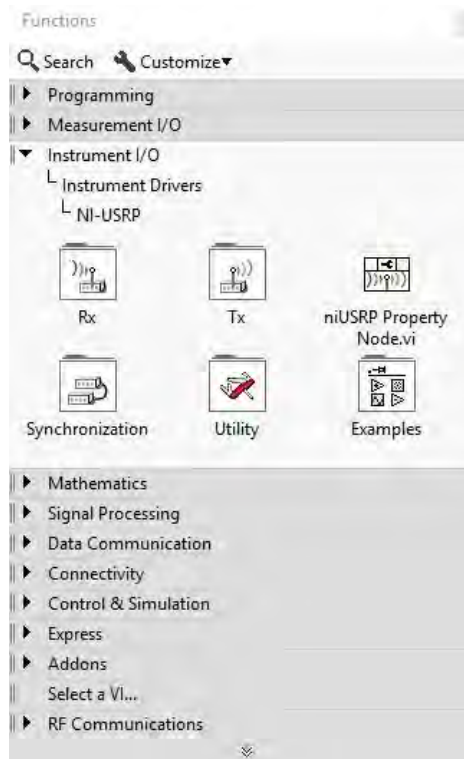


Ilustración 23: Bloques principales de NI-USRP.

3.2.1 Bloques de Transmisor.

El flujo general de la programación está dividida en 4 secciones que son abrir, configurar, utilizar y cerrar, como se muestra en la ilustración 24. [9]

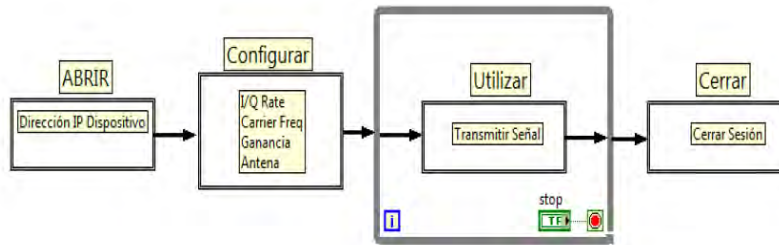


Ilustración 24: Flujo general de programación.¹⁸

3.2.1.1 Parámetros de configuración.

Nombre del dispositivo.

Dirección IP.

I/Q rate.

Velocidad de muestreo en S/s.

Carrier Frequency

Frecuencia de la portadora o carrier en Hz.

Ganancia

Ganancia en dB.

Nombre de la antena para transmitir / recibir

Tx1, Rx1, Rx2

3.2.1.2 Flujo básico de programación.

En la siguiente ilustración 25 se muestra el flujo de programación de un transmisor, desde como abrir una sesión Tx, configurar la señal, transmitir la señal y cerrar la sesión. [11]

¹⁸ [11]

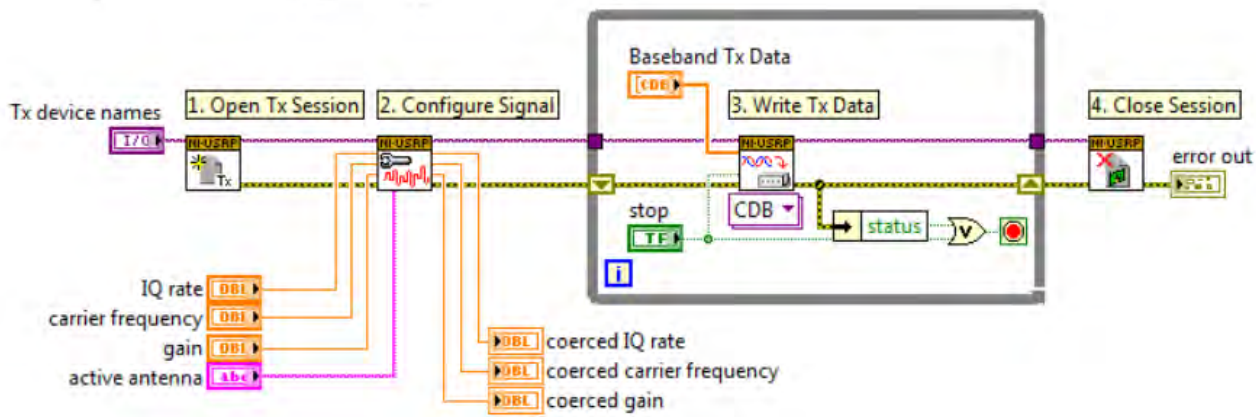


Ilustración 25: Esquema básico del transmisor.¹⁹

3.2.1.3 Iniciar una sesión USRP Tx.

Abre una sesión Tx en los dispositivos especificados en el parámetro nombres de dispositivo y devuelve el identificador de sesión que utiliza para identificar esta sesión de instrumento en todos los VI's subsiguientes.



Ilustración 26: niUSRP Open Tx Session.vi

En la ilustración 26 se muestra el VI de inicio de sesión de transmisión se usa para el reconocimiento inicial del USRP, y los parámetros importantes son:

- Device Names: se especifica el nombre o IP del dispositivo.
- Reset: Especifica si se debe restablecer el dispositivo a un estado de inicialización conocido.
- Error in: Describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar ese nodo.
- Session handle out: Pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: Se obtiene de este VI e identifica esta sesión Tx.

¹⁹ [6]

- Error out: Contiene información de error. [11]

3.2.1.4 Configurar señal Tx.

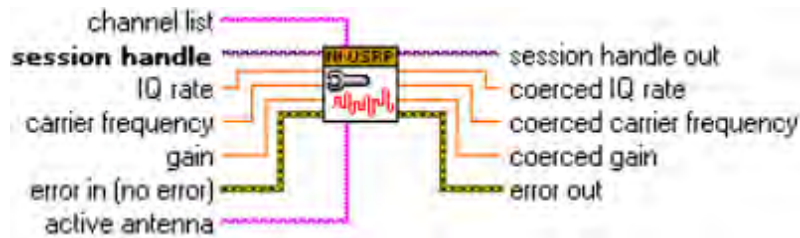


Ilustración 27: niUSRP Configure Signal.vi²⁰

En la ilustración 27 se muestra el VI de configuración de señal los parámetros de configuración son los siguientes: [11]

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: se obtiene del niUSRP Open Tx Session VI o de niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión particular de Tx o Rx.
- IQ rate: especifica la velocidad de los datos I/Q en banda base en muestras por segundo.
- Carrier frequency: especifica la frecuencia portadora, en Hz, de la señal RF.
- Gain: especifica la ganancia agregada, en dB, aplicada a la señal RF.
- Channel list: especifica el canal configurar.
- Active antenna: especifica el puerto de antena que se utilizara para este canal.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: se obtiene del niUSRP Open Tx Session VI o de niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión particular de Tx o Rx.
- Coerced IQ rate: devuelve la tasa real de I/Q, en muestras por segundo, para esta sesión, coaccionado a las capacidades del dispositivo.

²⁰ [6]

- Coerced carrier frequency: devuelve la frecuencia portadora real, en Hz, para esta sesión, coaccionada a las capacidades del dispositivo.
- Coerced gain: devuelve la ganancia real, en dB, para esta sesión, coaccionada a las capacidades del dispositivo.
- Error out: contiene información de error.

3.2.1.5 Escribir datos Tx.

En estos bloques se escriben los datos en la lista de canales especificadas:

Escribe un grupo de datos de coma flotante complejos de doble precisión en el canal especificado. Los VIs del kit de herramientas de modulación utilizan el tipo de datos de clúster de coma flotante complejo de doble precisión. Utilice este VI en aplicaciones que utilizan los VIs de Modulation Toolkit.

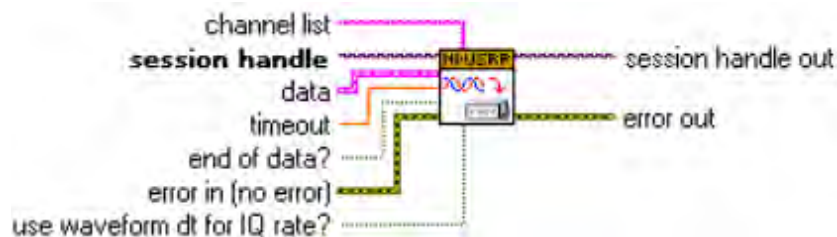


Ilustración 28: niUSRP Write Tx Data(CDB Cluster).²¹

En la ilustración 28 se muestra los parámetros de escritura de la señal en este caso son de un CDB Cluster, y son los siguientes: [11]

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: Se obtiene de niUSRP Open Tx Session VI e identifica una sesión Tx particular.
- Data: especifica las muestras de banda base para transmitir como datos de punto flotante complejos de doble precisión en un clúster, que también incluye información de muestreo.

²¹ [11]

- T0: NI-USRP ignora este valor.
- dt: especifica el tiempo entre los valores en la matriz Y.
- Y: especifica la forma de onda de banda base de valor complejo. Las partes real e imaginaria de esta matriz de datos compleja corresponden a los datos en fase (I) y en cuadratura (Q), respectivamente.
- Timeout: especifica el tiempo de espera, en segundos, antes de devolver un error si no se ha generado el número solicitado de muestras. Un valor negativo indica al conductor que espere indefinidamente.
- End of data: especifica si este es el último niUSRP Write Tx Data VI llamado para la operación de transmisión continua contigua.
 - True: especifica que la entrada de datos contiene el final de la transmisión de datos. La transmisión se interrumpe cuando se genera la última muestra de datos.
 - False: especifica que el usuario proporcionara más datos. Este valor es el valor predeterminado.
- Channel list: especifica el o los canales a los que se deben escribir los datos.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo. Esta entrada proporciona un error estándar en la funcionalidad.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: contiene información de error.

3.2.1.6 Cerrar sesión de Tx.

Cierra el identificador de sesión al dispositivo.

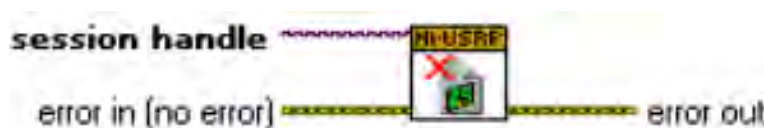


Ilustración 29: niUSRP Close Session Rx.vi²²

La ilustración 29 muestra el bloque vi que sirve para cerrar sesión del dispositivo, los parámetros a configurar son los siguientes:

²² [11]

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: Se obtiene de la niUSRP Open Tx Session VI o de la NIUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión particular de Tx o Rx.
- Error in: Describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo. Esta entrada proporciona un error estándar en la funcionalidad.
- Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.2.2 Bloques de Receptor.

La ilustración 30 muestra el flujo de programación de una aplicación de recepción (Rx) utilizando NI-USRP. Este diagrama ilustra cómo abrir una sesión Rx, configurar la señal, iniciar la adquisición, recibir los datos, analizar y presentar los datos, detener la adquisición y cerrar la sesión Rx.

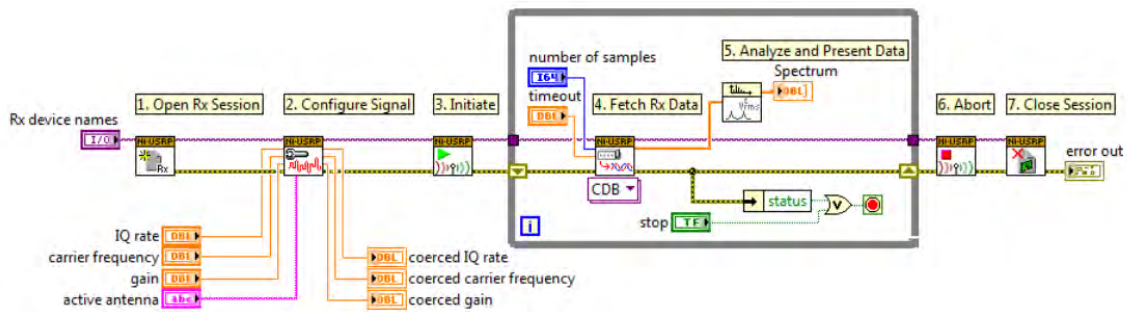


Ilustración 30: Esquema básico de receptor.²³

3.2.2.1 Iniciar sesión de un USRP Rx.

²³ [11]

Con este VI se abre una sesión de Rx en los dispositivos especificados en el parámetro de nombres de dispositivo y devuelve el identificador de sesión que utiliza para identificar esta sesión de instrumento en todos los VIs niUSRP posteriores.



Ilustración 31: niUSRP Open Rx Session.vi²⁴

La ilustración 31 muestra el bloque de inicio de sesión de un Rx, los parámetros a configurar en el son:

- Device names: especifica el nombre o dirección IP del dispositivo.
- Reset: especifica si se debe restablecer el dispositivo a un estado de inicialización.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: se obtiene de este VI e identifica esta sesión Rx.
- Error out: contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.2.2.2 Inicia la adquisición de señal USRP Rx.

Este VI inicia la adquisición de la forma de onda de una sesión Rx. Debe iniciar la sesión de Rx antes de llamar a un VI de datos para recuperar los datos de forma de onda. Se inicia la generación de forma de onda cuando se proporcionan datos utilizando el niUSRP Write Tx Data VI.



Ilustración 32: niUSRP Initiate.vi²⁵

²⁴ [11]

²⁵ [11]

En la ilustración 32, se muestra el bloque donde se realiza la adquisición de la forma de onda de la señal, los parámetros que maneja son los siguientes:

- Session handle: identifica la session de instrument.
- Session handle: se obtiene de la niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo. Esta entrada proporciona un error estándar en la funcionalidad.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: Se obtiene de la niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.2.2.3 Inicia la recolección de datos USRP Rx.

Recopila un conjunto de datos de punto flotante complejos de doble precisión desde el canal especificado. Los VIs de herramientas de modulación utilizan el tipo de datos de cluster de coma flotante de precisión doble complejo. Este VI se utiliza en aplicaciones que utilizan los VIs de Modulation Toolkit.

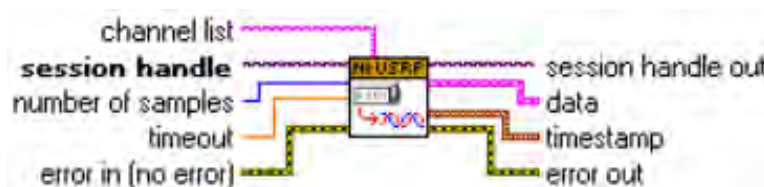


Ilustración 33: niUSRP Fetch Rx Data (poly).v²⁶

En la ilustración 33, se muestra el bloque donde se realiza la recolección de datos, los parámetros que tiene son los siguientes:

²⁶ [11]

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: se obtiene de niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Number of samples: especifica el número de muestras a extraer del canal de adquisición.
- Time out: especifica el tiempo de espera, en segundos, antes de devolver un error si no se ha adquirido el número de muestras solicitado. Un valor negativo indica al conductor que espere indefinidamente.
- Channel list: especifica el canal o los canales a partir de los cuales se deben obtener los datos.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: se obtiene de la niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Data: devuelve las muestras de banda base recibida como datos de punto flotante complejos de doble precisión en un clúster, que también incluye información de muestreo.
- Timestamp: devuelve la marca de tiempo de la primera muestra Rx devuelta e indica el tiempo asociado con la primera muestra de la forma de onda, de acuerdo con el temporizador de dispositivo integrado.
 - Whole seconds: es el número entero de segundos para el tiempo asociado con la primera muestra de la forma de onda, de acuerdo con el temporizador del dispositivo de a bordo.
 - Fractional seconds: es el valor de punto flotante de doble precisión que representa la fracción restante de un segundo para el tiempo asociado con la primera muestra de la forma de onda, según el temporizador de dispositivo de a bordo.
- Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.2.2.4 Detener la adquisición iniciada USRP Rx.

Detiene una adquisición iniciada previamente. Para adquisiciones finitas, llamar a este VI es opcional a menos que desee detener la adquisición antes de que se complete. Si la adquisición se interrumpe con éxito, el controlador pasa al estado Listo, estas se realizan con el bloque que se muestra en la ilustración 34.



Ilustración 34: niUSRP Abort.vi²⁷

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: se obtiene de niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Error in: describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo.
- Session handle out: pasa una referencia a su sesión de instrumento al VI siguiente.
- Session handle out: se obtiene de la niUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión Rx particular.
- Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.2.2.5 Cerrar sesión de USRP Rx.

Cierra el identificador de sesión al dispositivo.



Ilustración 35: niUSRP Close Session Tx.vi

²⁷ [11]

La ilustración 35 muestra el bloque vi que sirve para cerrar sesión del dispositivo, los parámetros a configurar son los siguientes:

- Session handle: identifica la sesión del instrumento.
- Session handle: Se obtiene de la niUSRP Open Tx Session VI o de la NIUSRP Open Rx Session VI e identifica una sesión particular de Tx o Rx.
- Error in: Describe las condiciones de error que se producen antes de ejecutar este nodo. Esta entrada proporciona un error estándar en la funcionalidad.
- Error out: Contiene información de error. Esta salida proporciona la funcionalidad de error estándar.

3.3 Descripción niUSRP EX PSK Tx.vi Block Diagram

Ahora se realiza una descripción del flujo del funcionamiento del VI transmisor que se utilizó en la implementación de las pruebas experimentales. Tal VI es *niUSRP EX PSK Tx.vi Block Diagram*. Este programa basado en diagramas consta en cuatro secciones donde se dividen las actividades necesarias para construir la señal del transmisor, estas son: Open Tx Session, Configure Signal, Write Tx Data, Close Session, el diagrama de bloques de programación implementado se muestra en la ilustración 36.

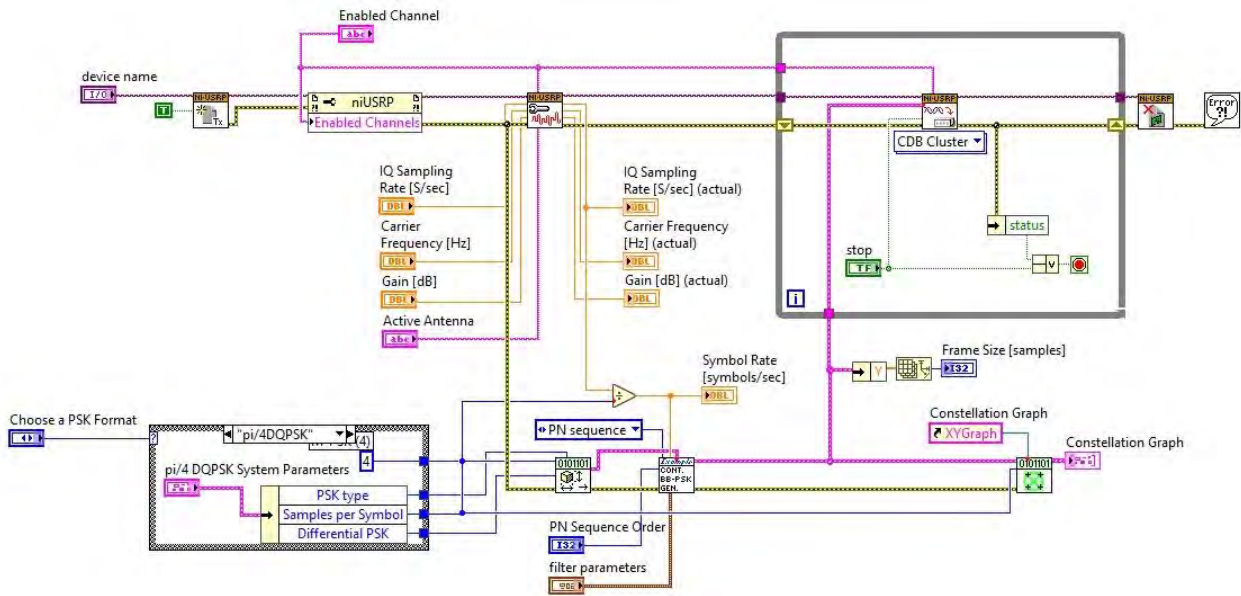


Ilustración 36: niUSRP EX PSK Tx.vi

3.3.1 Open Tx Session

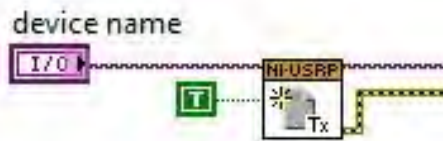


Ilustración 37: Open Tx Session del transmisor.

En esta primera sección (ver ilustración 37) el programa se encarga de detectar el dispositivo del cual será transmitida la señal, la localización del dispositivo se realiza por medio de la dirección IP antes configurada en el dispositivo. Para la localización de dicho dispositivo se le da a conocer a este bloque la dirección IP a buscar por medio de una mini interfaz (ver ilustración 38).

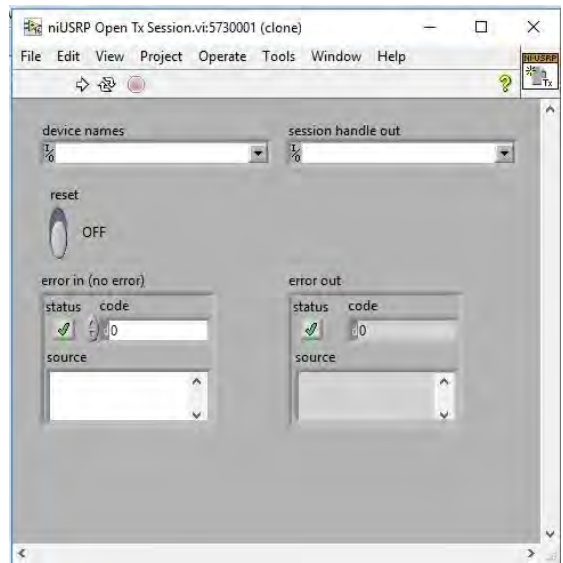


Ilustración 38: Open Tx Session configuración.

3.3.2 Configure Signal

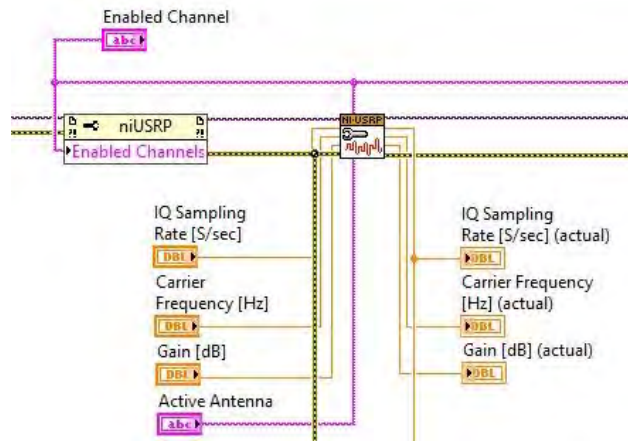


Ilustración 39: Configure Signal 1 del transmisor.

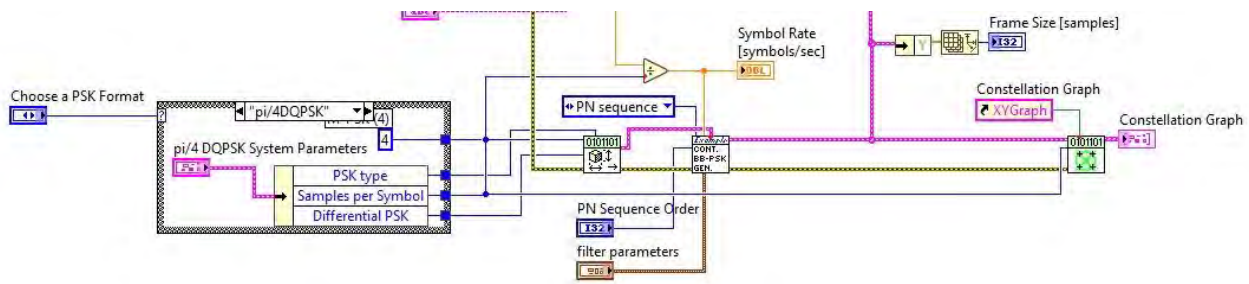


Ilustración 40: Configure Signal 2 del transmisor.

En esta sección se realiza la configuración de la señal a enviar, en él se ingresan todos los parámetros necesarios para que la señal sea creada, los parámetros son session handle, session handle out, channel list, coerced IQ rate, coerced carrier frequency, IQ rate, active antenna, gain, carrier frequency, error in y error out, todos estos parámetros se fueron descritos con anterioridad, esas instrucciones son las que se configuran en la sección que se muestra en la ilustración 39, en la ilustración 40 se elige el formato a PSK, se tiene la elección entre los formatos BPSK, QPSK, PSK, 8-PSK y 16-PSK. Después de esa lección se realiza la generación de parámetros en mapa de símbolos de los datos proporcionados, y ya en el último bloque se realiza las gráficas de esos símbolos en una constelación.

3.3.3 Write Tx Data

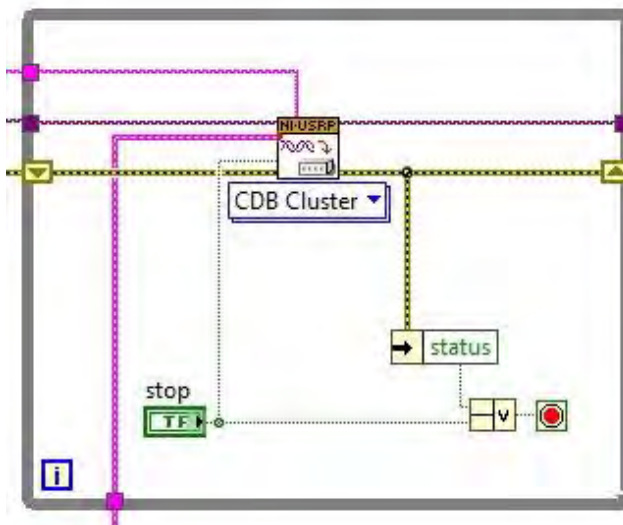


Ilustración 41: Write Tx Data.

En esta sección del programa (ver ilustración 41) se realiza la escritura de todos los datos requeridos que fueron obtenidos de la configuración de la señal que son la session handle, data y el timeout, todos esos datos son enviados mediante el channel list que se elija ya sea single o multi.

3.3.4 Close session



Ilustración 42: Close Session transmisor.

En esta sección del programa (ver ilustración 42) se cierra la sesión del dispositivo manejando un identificador para que más adelante este mismo sea reconocido.

3.4 Descripción niUSRP EX PSK Rx.vi Block Diagram

Ahora se realiza una descripción del flujo del funcionamiento del VI receptor que se utilizó en la implementación de las pruebas experimentales. Tal VI es *niUSRP EX PSK Rx.vi Block Diagram*. Este programa basado en diagramas consta en siete secciones donde se dividen las actividades necesarias para construir la señal del transmisor, estas son: Open Rx Session, Configure Signal, Initiate, Fetch Rx Data, Analyze and present Data, Abort, Close session.

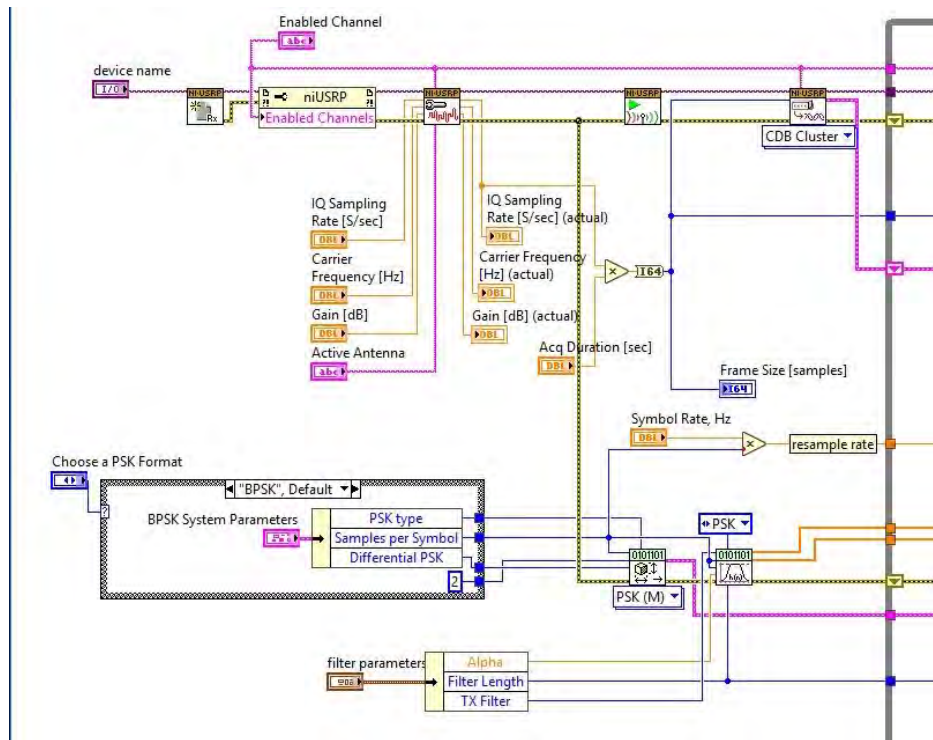


Ilustración 43: niUSRP EX PSK Rx.vi parte 1.

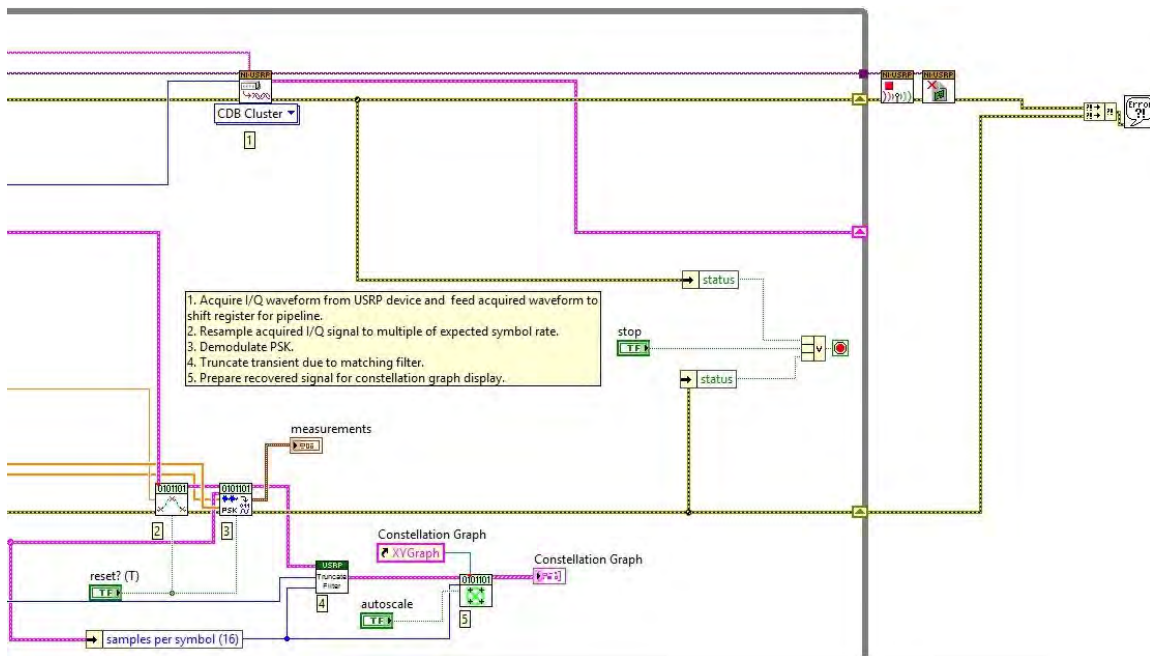


Ilustración 44: niUSRP EX PSK Rx.vi parte 2.

3.4.1 Open Rx Session

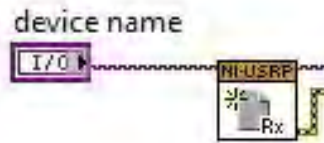


Ilustración 45: Open Rx Session.

En esta primera sección el programa (ver ilustración 45) se encarga de detectar el dispositivo del cual será recibida la señal, la localización del dispositivo se realiza por medio de la dirección IP antes configurada en el dispositivo. Para la localización de dicho dispositivo se le da a conocer a este bloque la dirección IP a buscar por medio de una mini interfaz (ver ilustración 46).

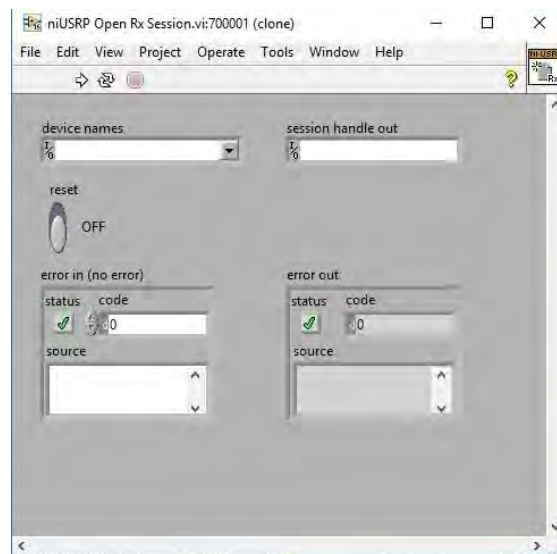


Ilustración 46: Open Rx Session configuración.

3.4.2 Configure signal

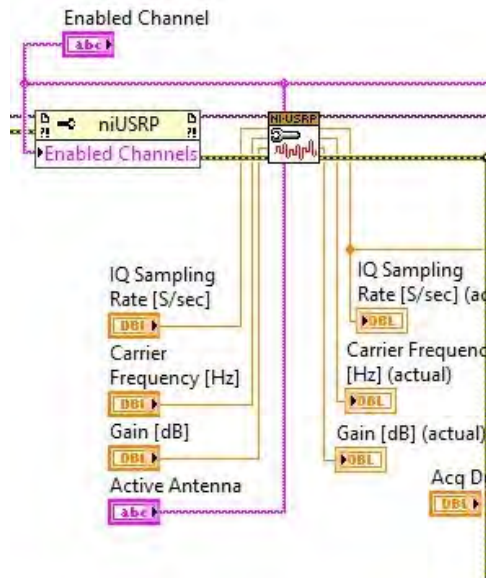


Ilustración 47: Configure Signal Rx.

En esta sección se realiza la configuración de la señal a recibir, en él se ingresan todos los parámetros necesarios para que la recepción de esta sea la adecuada, los parámetros son session handle, session handle out, channel list, coerced IQ rate, coerced carrier frequency, IQ rate, active antenna, gain, carrier frequency, error in y error out, todos estos parámetros se fueron descritos con anterioridad, esas instrucciones son las que se configuran en la sección que se muestra en la ilustración 47.

3.4.3 Initiate

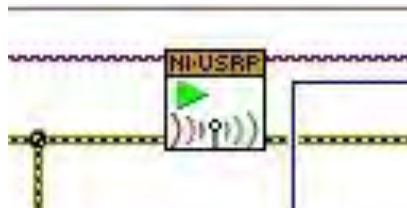


Ilustración 48: Initiate.

En esta sección del programa (ver ilustración 48) se inicia la adquisición de los datos para construir la señal enviada por el transmisor.

3.4.4 Fetch Rx Data

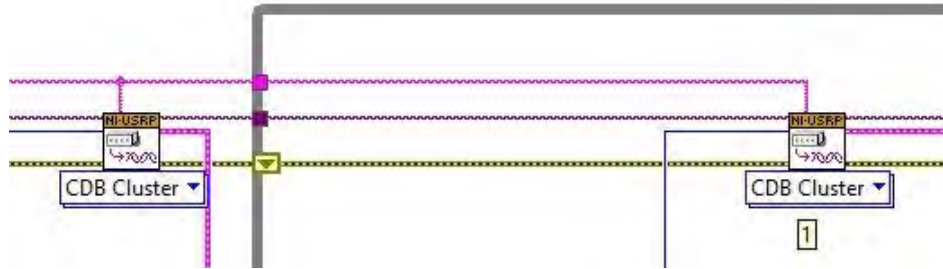


Ilustración 49: Fetch Rx Data

En esta sección del programa después de haber adquirido todos los datos se realiza una recopilación o separación por conjunto de los datos para poder realizar su análisis y representación. Se recolectan los datos tales como session handle, number of samples, timeout, data, y el más importante el channel list que debe de coincidir con el transmisor.

3.4.5 Analyze and Present Data

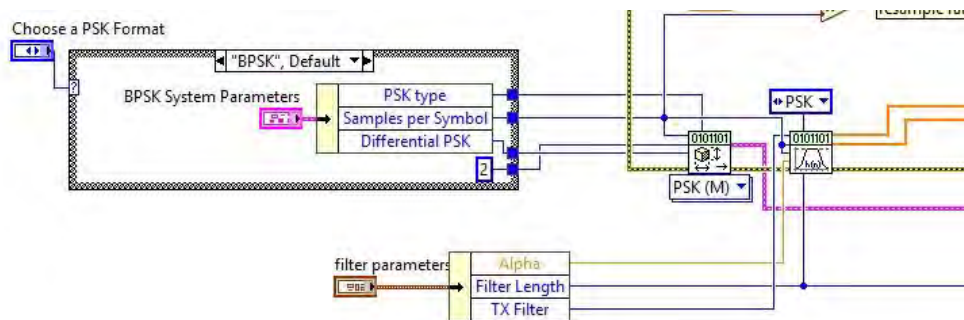


Ilustración 50: Analyze Data.

En esta sección del programa (ver ilustración 50) se realiza el análisis de los datos para poder realizar la demodulación dependiendo del formato de modulación que se manejó en el

transmisor, después se realiza la transformación de datos adquiridos en mapas de símbolos para realizar su graficación.

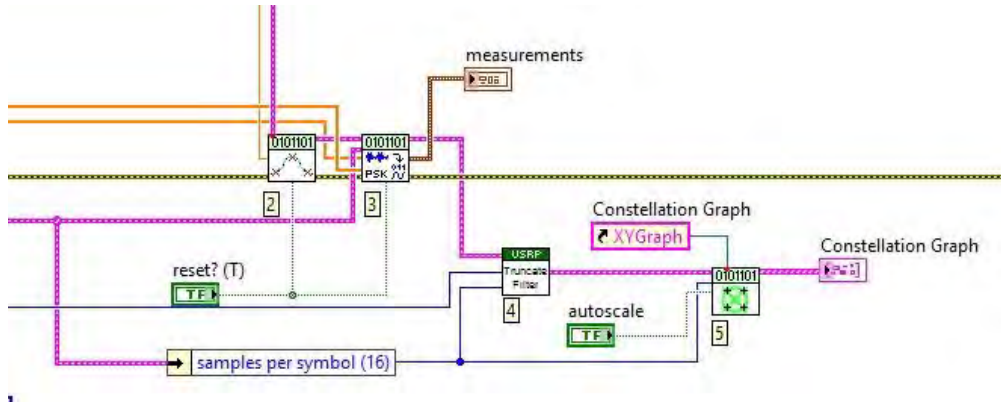


Ilustración 51: Present Data.

Ahora que los datos fueron recopilados y analizados se realiza su graficación y presentación por grafica de constelación esto se realiza en la sección del programa present data (ver ilustración 51), si los datos no fueron correctamente recibidos solo se notara una gráfica de constelación sin forma.

3.4.6 Abort Rx



Ilustración 52: Abort.

En esta sección del programa (ver ilustración 52) es donde se detiene la adquisición previamente iniciada, se le proporcionan parámetros para saber cuándo realizar la detención. Los datos son configurados en su interfaz (ver ilustración 53).

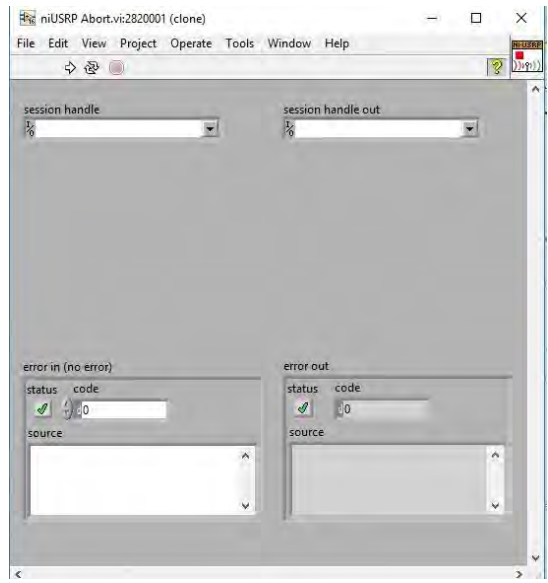


Ilustración 53: Abort configuración.

3.4.7 Close Session Rx

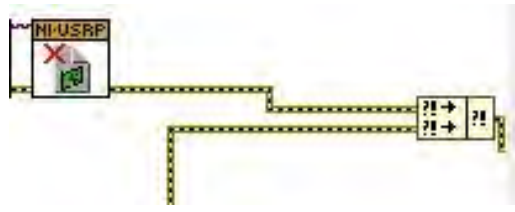


Ilustración 54: Close session Rx.

En esta sección del programa (ver ilustración 54) se cierra la sesión del dispositivo manejando un identificador para que más adelante este mismo sea identificado.

Capítulo 4 Resultados y Conclusiones

4.1 Conexión física del dispositivo

Para la realización de todo el proyecto se utilizaron varios dispositivos, que son de suma importancia para la comprobación de la teoría antes manejada, la parte más importante es la realización de la conexión física de los dispositivos que ahora se explicara más a detalle.

4.1.1 Dispositivos requeridos

4.1.1.1 Computadora

El dispositivo por el cual se realiza el trabajo más importante, la computadora (ver ilustración 55) contaba con los requerimientos básicos (ver ilustración 56) para correr LabVIEW, que es la manipulación del software, es el computador los parámetros que debe de cumplir los requerimientos del software con el que se manipulan los SDR.



Ilustración 55: Computadora para manejo de SDR.

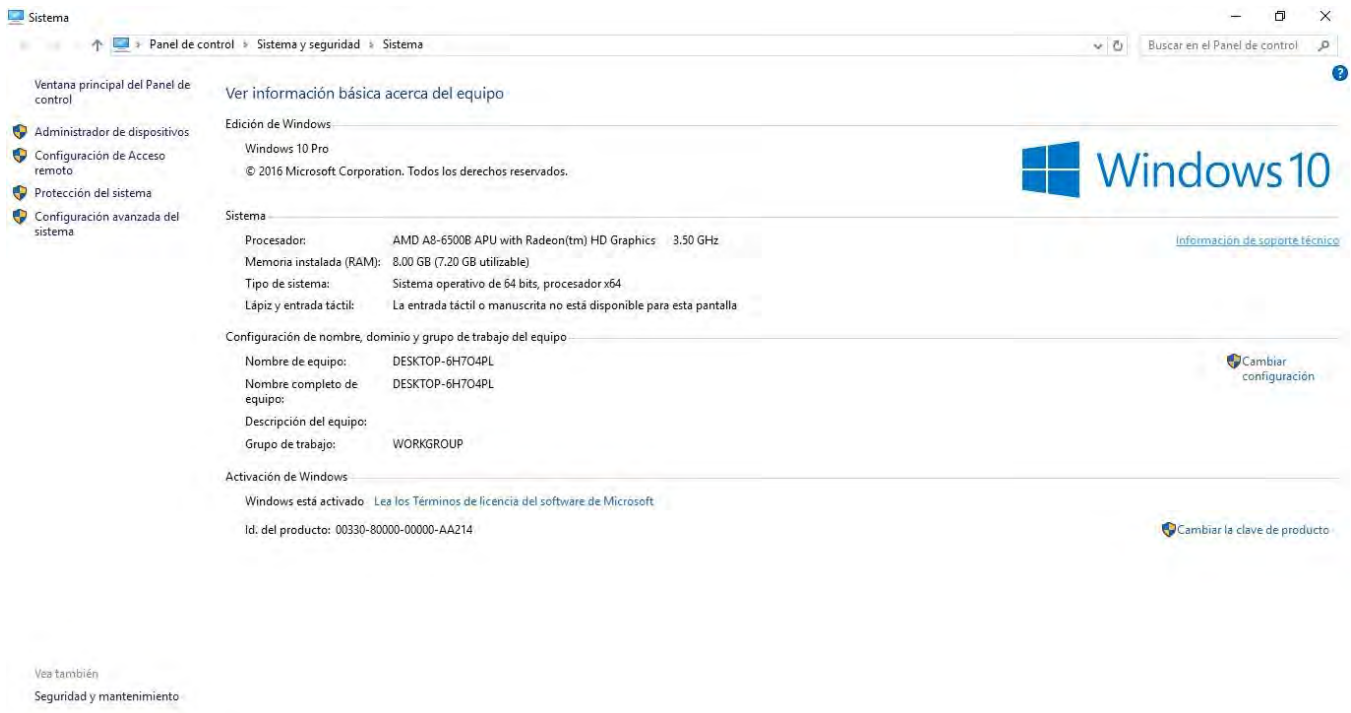


Ilustración 56: Especificaciones de la computadora.

4.1.1.2 Radio USRP 2920

El radio que se maneja es un NI-USRP 2920 (ver ilustración 57), de este dispositivo ya se encuentran todas las especificaciones en el capítulo anterior de este trabajo, para conectar este dispositivo se usa un cable Gigabit Ethernet, al puerto de la computadora.



Ilustración 57: Radio NI-USRP 2920.



Ilustración 58: Antenas de USRP.

Las antenas (ver ilustración 58) se conectan en los puertos Tx1 para el transmisor y en el puerto Rx1 para el receptor respectivamente.



Ilustración 59: Puertos Tx y Rx de USRP.



Ilustración 60: Cable UTP categoría 5.

El cable UTP categoría 5 es el encargado de realizar la transferencia de información entre el radio USRP 2920 y la computadora.



Ilustración 61: Conectores de UTP categoría 5.

Estos deben de ir conectados a la computadora y el radio USRP 2920 cada uno en su puerto definido, como se muestra en la ilustración 62.



Ilustración 62: NI-USRP 2920 conectado.

4.2 Descripción niUSRP EX PSK Tx.vi Front Panel

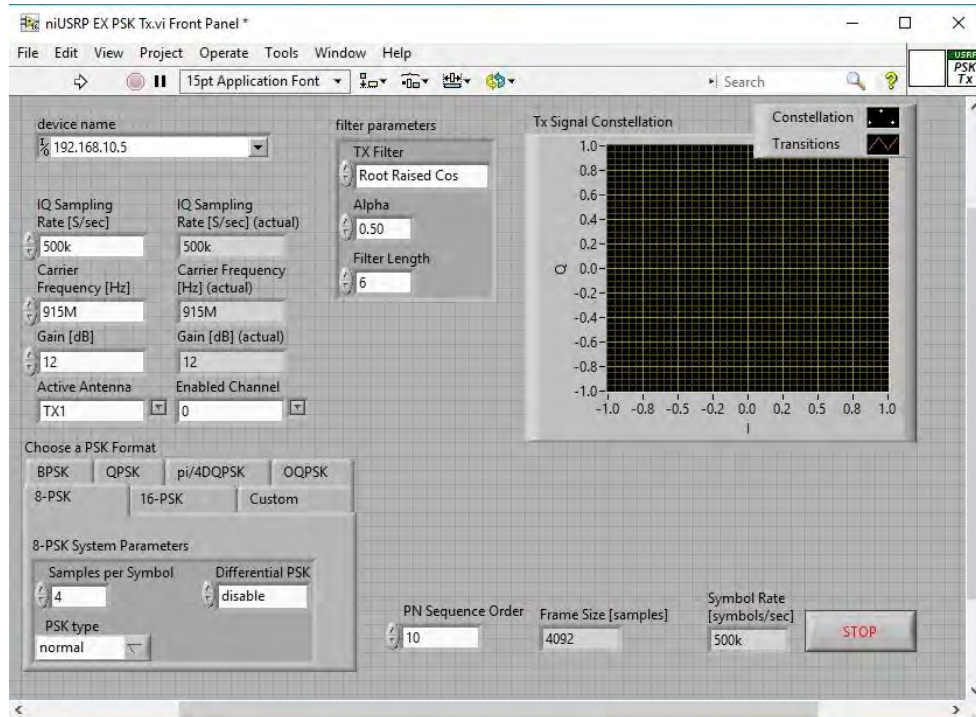


Ilustración 63: niUSRP EX PSK Tx.vi Front Panel.

El front panel es la representación de toda la programación de bloques que se muestra anteriormente, en la ilustración 63 se muestra el panel completo del transmisor. Los parámetros a llenar en este panel son los mismos manejados en los diagramas de bloques, en si es una representación amigable y manejable para el usuario.

4.2.1 Descripción de interfaz.

4.2.1.1 Device name

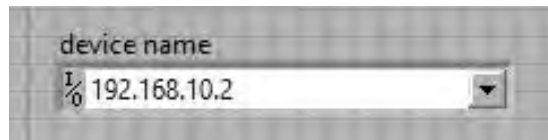


Ilustración 64: Device name de Tx.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 64) es donde se configura la dirección IP asignada al dispositivo para que el programa pueda reconocerlo y de esa manera iniciar sesión.

4.2.1.2 Tabla de configuración

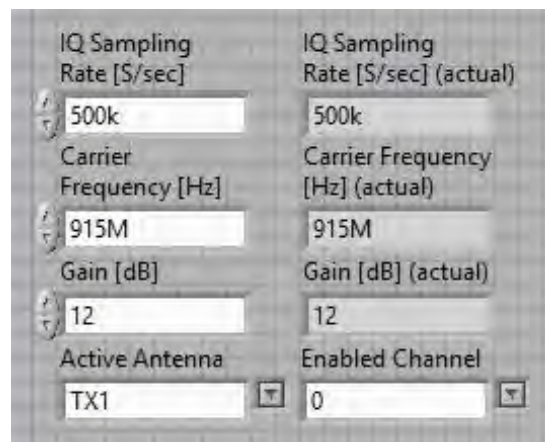


Ilustración 65: Tabla de configuración.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 65) se configura todos los parámetros que la señal debe de tener para que sea creada, el primer dato a ingresar es el IQ sampling rate en este se especifica la velocidad de los datos en banda base, el siguiente dato a configurar es el Carrier frequency donde se especifica la frecuencia portadora en Hz, después se configura el la ganancia de la señal en dB, y por último la antena activa de nuestro dispositivo.

4.2.1.3 Filter parameters

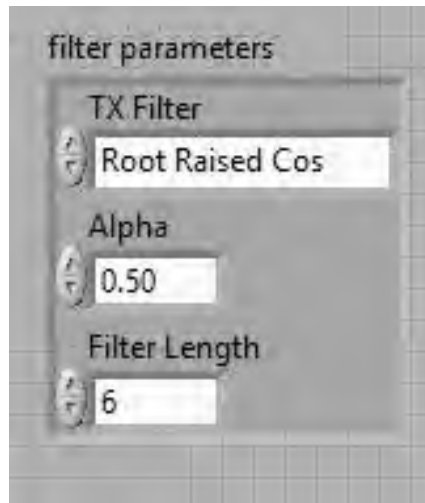


Ilustración 66: Filter parameters.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 66) se realizan las modificaciones necesarias para que los parámetros que se manejen sean los deseados.

4.2.1.4 Choose a PSK 4 Format

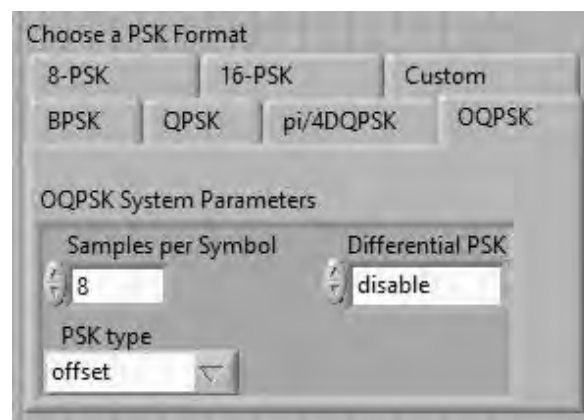


Ilustración 67: Choose a PSK Format.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 67) se realiza la elección del formato de modulación, de igual manera se puede modificar la cantidad de muestras por símbolo, la diferencial de PSK y el tipo.

4.2.1.5 Tx Signal Constellation

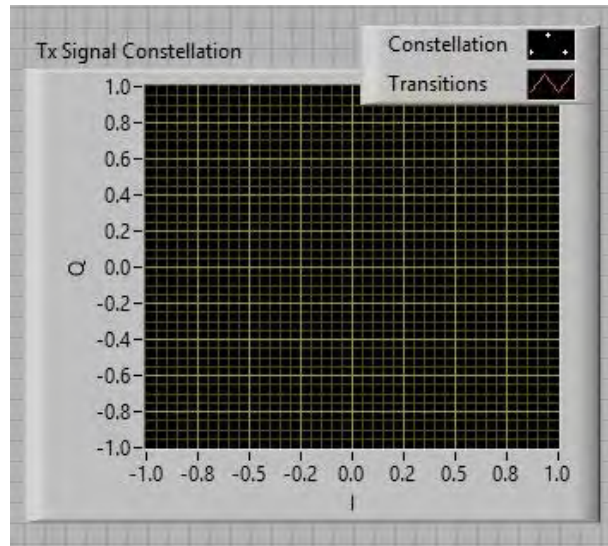


Ilustración 68: Tx Signal Constellation.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 68) se muestra los resultados de la señal a enviar, es decir se gráfica, los puntos blancos representan la constelación y la transición que sería la unión de los puntos representada por líneas rojas.

4.2.2 Representación de constelaciones de transmisor.

Ahora se presentan las gráficas de constelaciones y transiciones dependiendo del formato PSK que se elija.

Representación de 8-PSK.

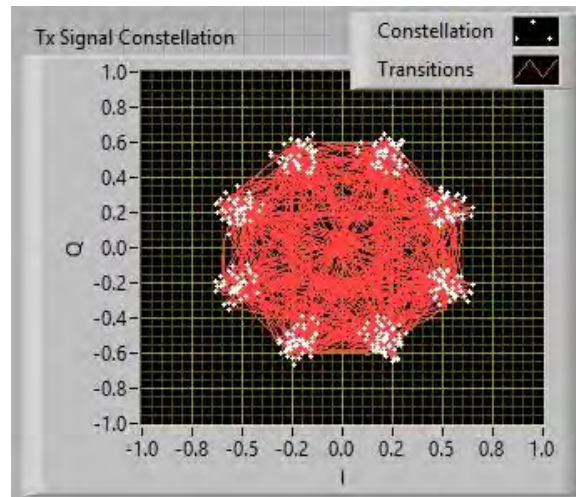


Ilustración 69: Representación gráfica de transmisor 8-PSK.

Representación de 16-PSK.

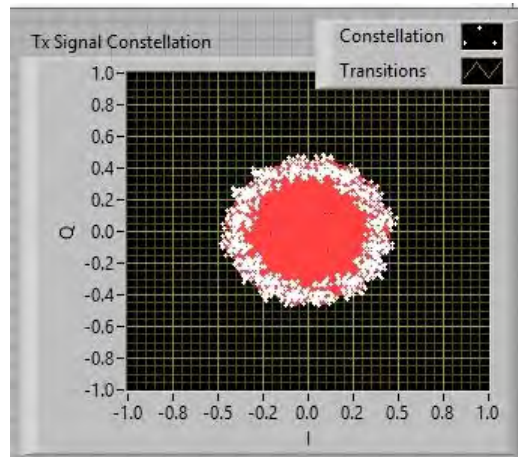


Ilustración 70: Representación gráfica de transmisor 16-PSK.

Representación de OQPSK

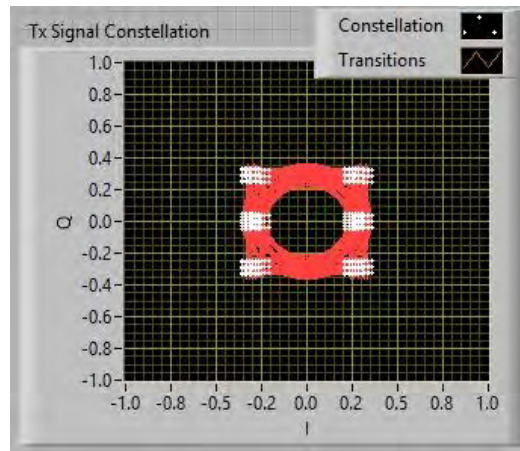


Ilustración 71: Representación gráfica de transmisor OQPSK.

Representación de QPSK

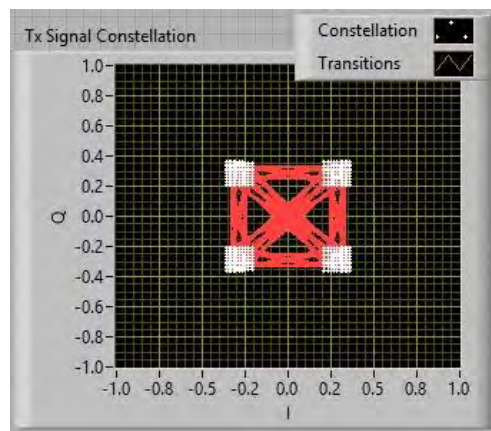


Ilustración 72: Representación gráfica de transmisor QPSK.

Representación de BPSK

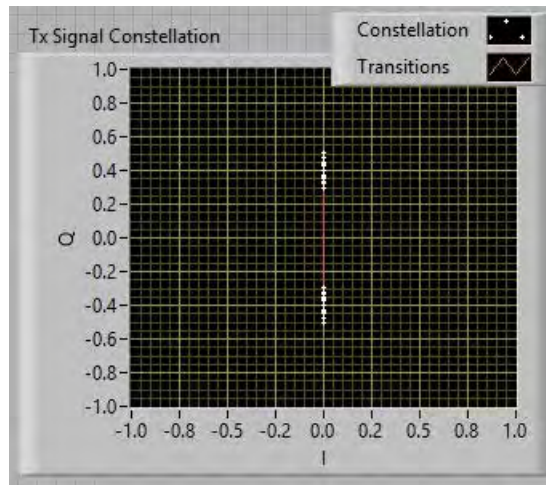


Ilustración 73: Representación gráfica de transmisor BPSK.

Representación de $\pi/4$ DQPSK

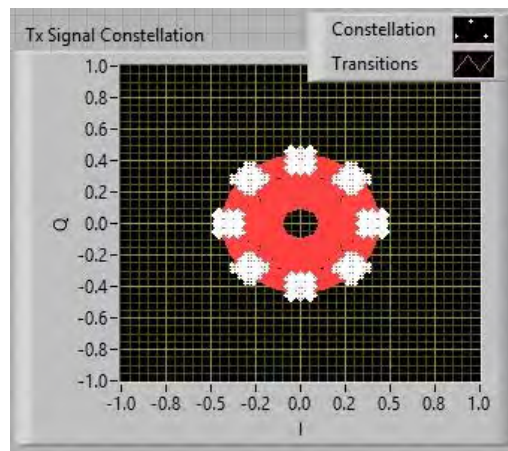


Ilustración 74: Representación gráfica de transmisor $\pi/4$ DQPSK.

4.3 Descripción niUSRP EX PSK Rx.vi Front Panel

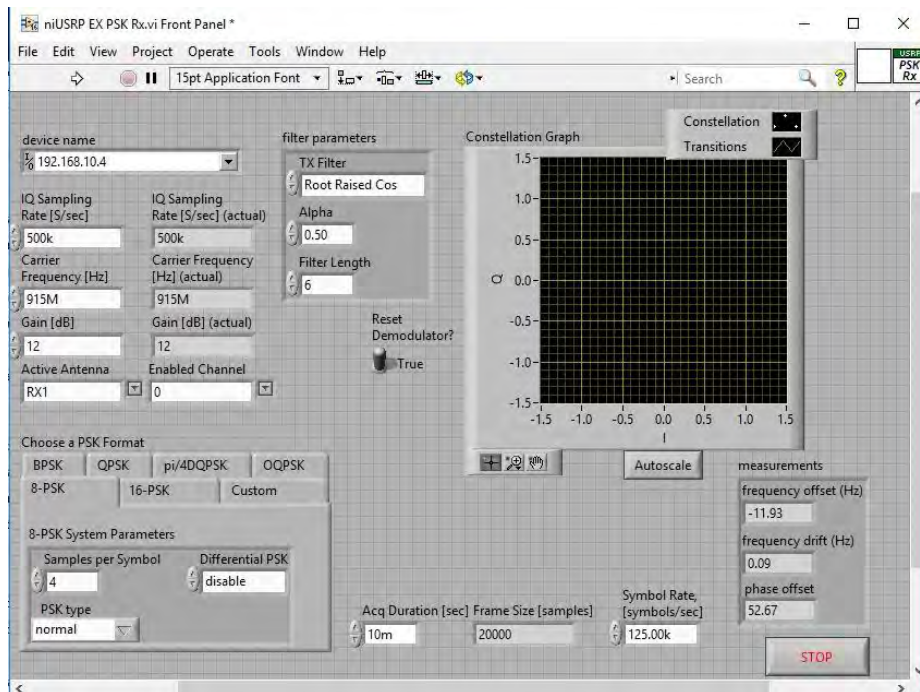


Ilustración 75: niUSRP EX PSK Rx.vi Front Panel

El front panel es la representación de toda la programación de bloques que se muestra anteriormente, en la ilustración 75 se muestra el panel completo del receptor. Los parámetros a llenar en este panel son los mismos manejados en los diagramas de bloques.

4.3.1 Descripción de interfaz

4.3.1.1 Device name

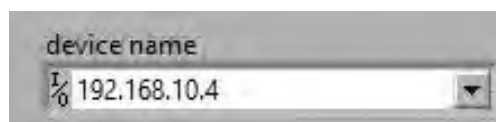


Ilustración 76: Device name de Rx.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 76) es donde se configura la dirección IP asignada al dispositivo para que el programa pueda reconocerlo y de esa manera iniciar sesión, en este caso debe de ingresar la IP del dispositivo que cumplirá la función de receptor, ya sea la misma dirección u otra.

4.3.1.2 Tabla de configuración

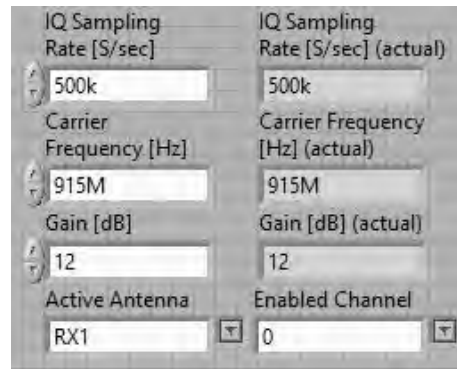


Ilustración 77: Tabla de configuración.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 77) se configura todos los parámetros que la señal debe de tener para que sea creada, el primer dato a ingresar es el IQ sampling rate en este se especifica la velocidad de los datos en banda base, el siguiente dato a configurar es el Carrier frequency donde se especifica la frecuencia portadora en Hz, después se configura el la ganancia de la señal en dB, y por último la antena activa de nuestro dispositivo, la configuración debe de ser apropiada a los datos que se reciban para poder interpretarla.

4.3.1.3 Choose a PSK format.

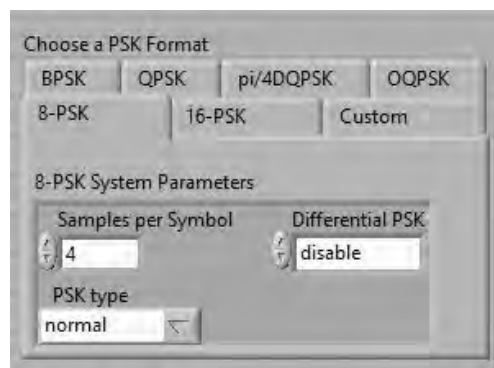


Ilustración 78: Choose a PSK format.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 78) se realiza la elección del formato de modulación, de igual manera se puede modificar la cantidad de muestras por símbolo, la

diferencial de PSK y el tipo, lo ideal es que la configuración que se plantea aquí sea la misma que en el transmisor para que la interpretación de la gráfica sea la más adecuada.

4.3.1.4 Measurements

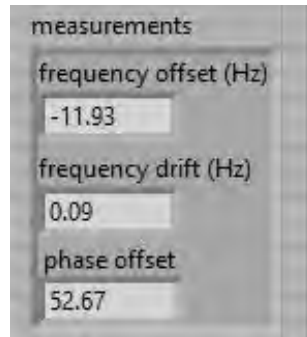


Ilustración 79: Measurements.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 79) se muestran todas las mediciones que se pueden obtener de la gráfica de constelación.

4.3.1.5 Constellation Graph

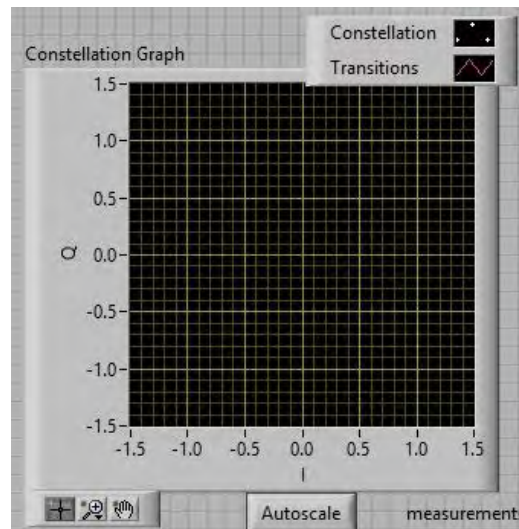


Ilustración 80: Constellation Graph.

En esta sección de la interfaz (ver ilustración 80) se muestra la gráfica de constelación recibida, dependiendo del formato de demodulación que se haya elegido con anterioridad.

4.3.2 Representación de constelaciones de receptor.

Ahora se presentan las gráficas de constelaciones y transiciones dependiendo del formato PSK que se elija en el transmisor.

Representación de 8-PSK.

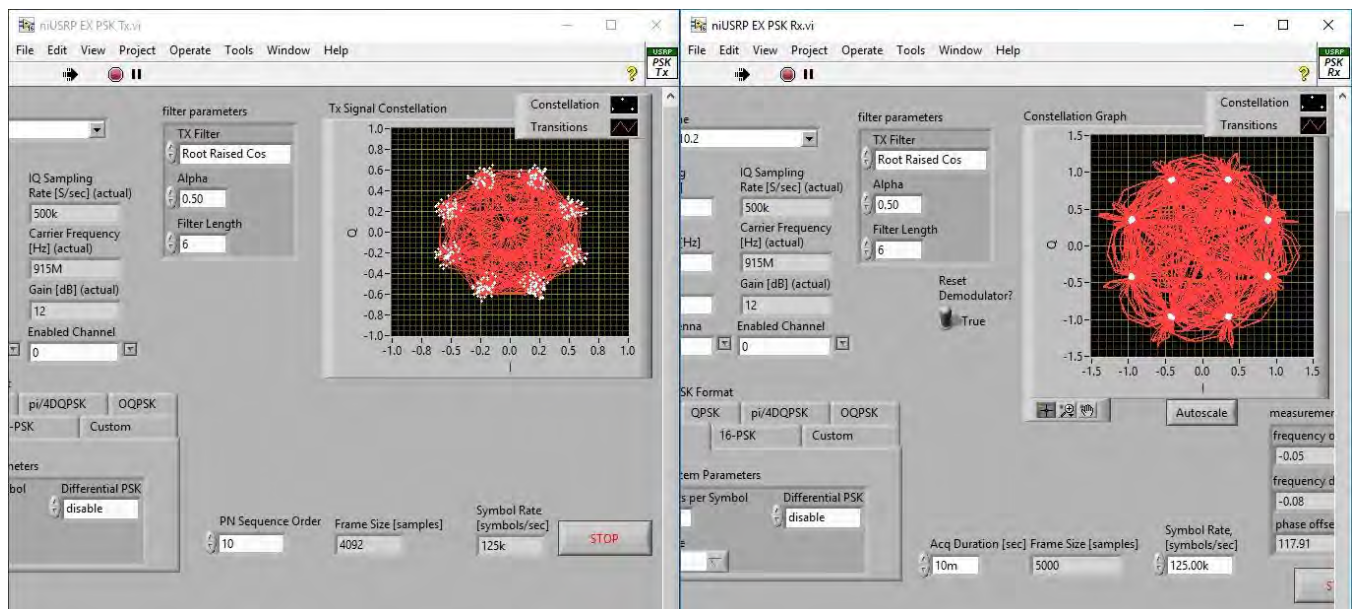


Ilustración 81: Representación gráfica de recepción de 8-PSK.

Representación de 16-PSK

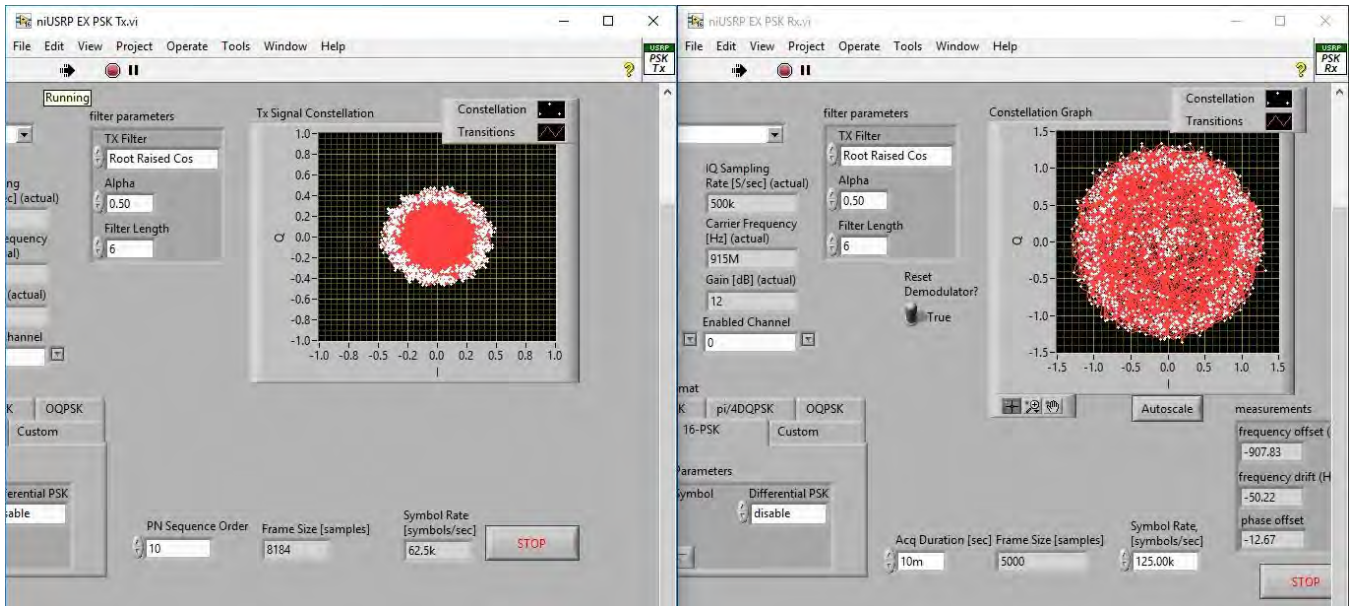


Ilustración 82: Representación gráfica de recepción de 16-PSK.

Representación de OQPSK

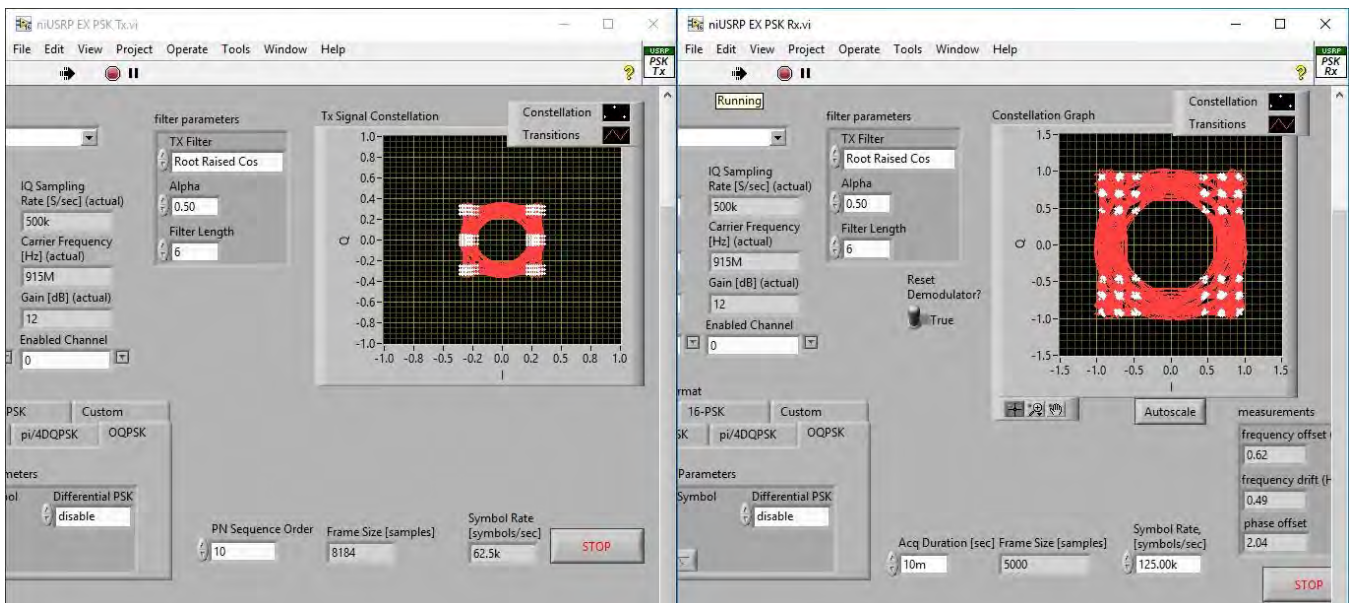


Ilustración 83: Representación gráfica de recepción de OQPSK.

Representación de QPSK

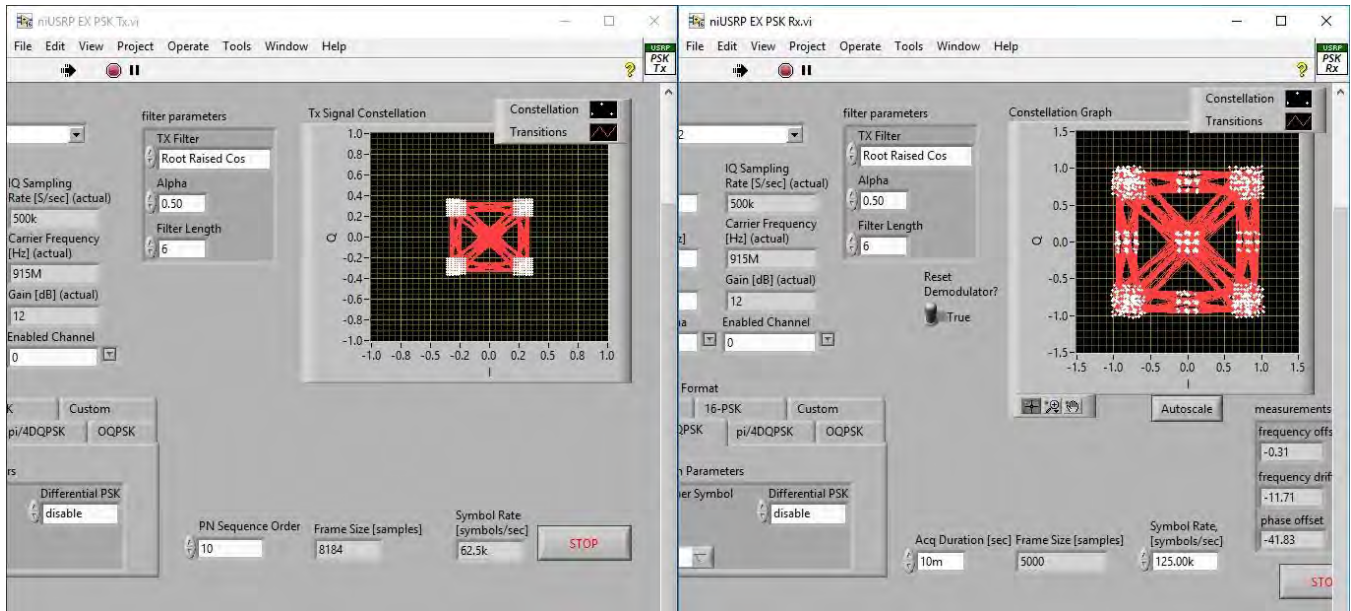


Ilustración 84: Representación gráfica de recepción de QPSK.

Representación de BPSK

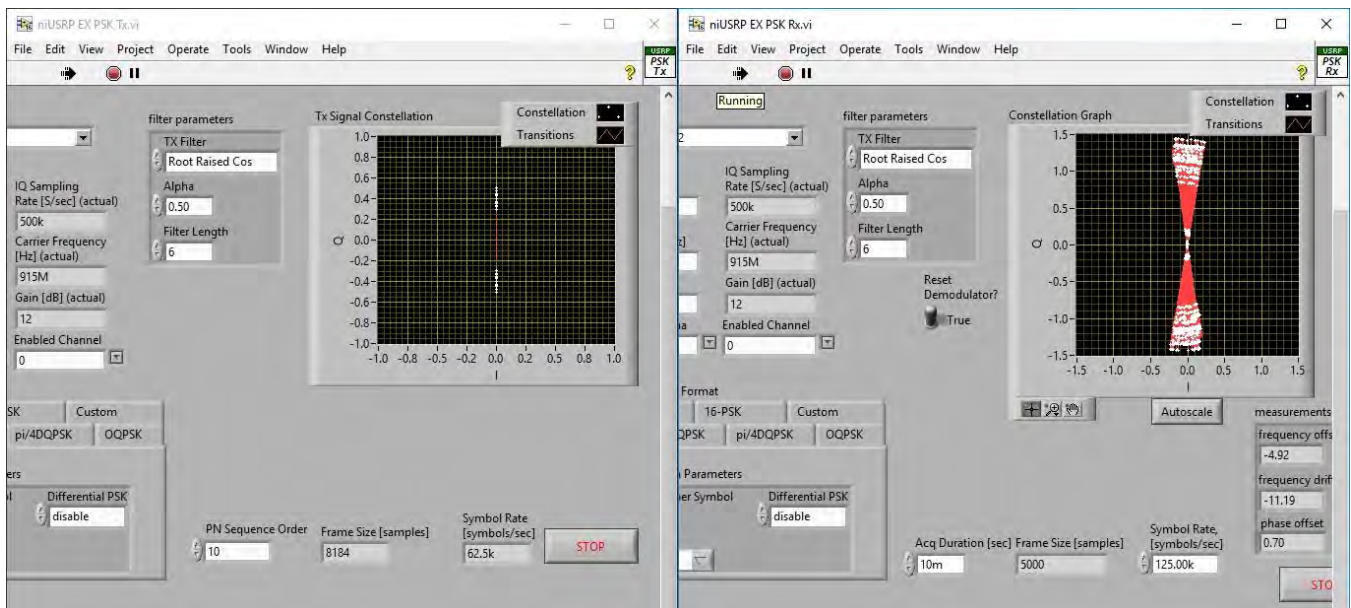


Ilustración 85: Representación gráfica de recepción de BPSK.

Representación de $\pi/4$ DQPSK

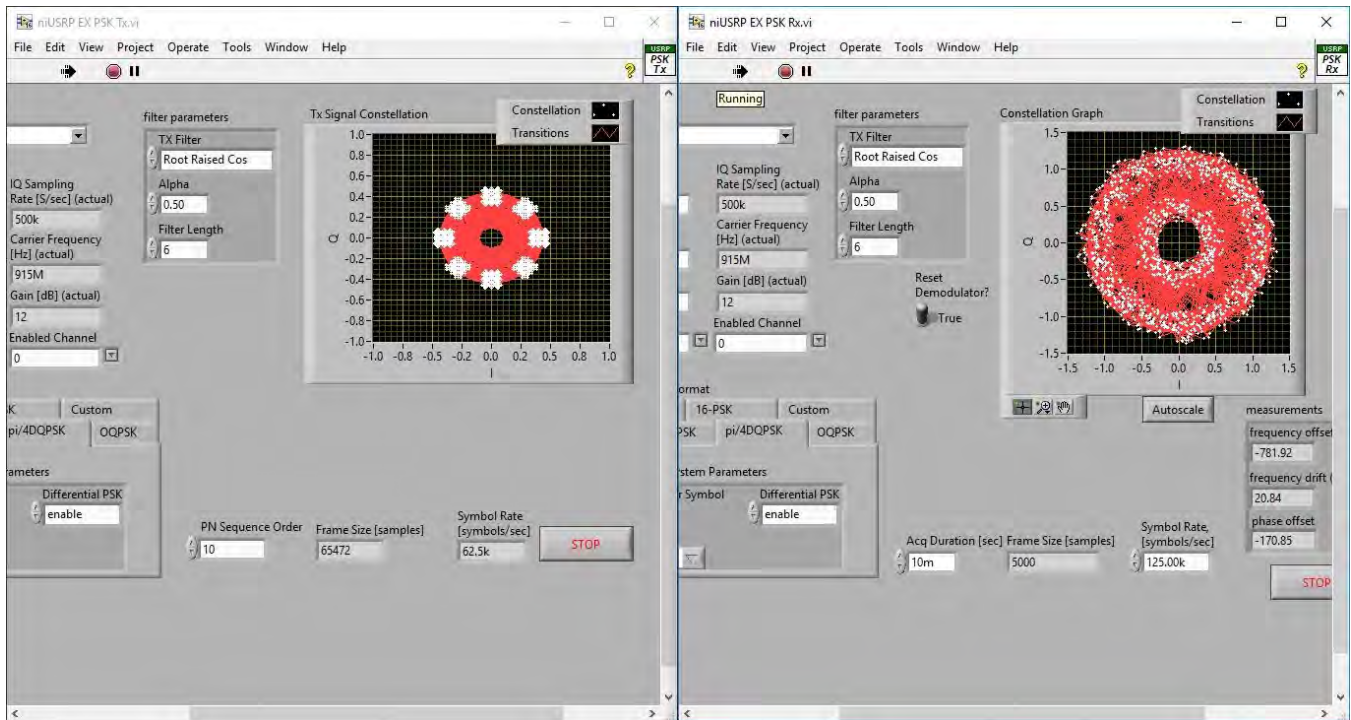


Ilustración 86: Representación gráfica de recepción de $\pi/4$ DQPSK.

4.4 Conclusiones

Este trabajo presenta el diseño y configuración de radios definidos por software o SDR. Los SDR utilizados pertenecen a la empresa National Instruments (denominados USRP) y que en conjunto con su software LabVIEW han permitido establecer un código base para la configuración de los mismos. El esquema diseñado, permite que los radios pueden ser configurados bajo diversos esquemas de modulación y lograr transmisiones de datos modulados en un esquema de transmisión-recepción. Durante el desarrollo del trabajo se revisaron los estándares de comunicación inalámbrica con la finalidad de definir las portadoras y esquemas de modulación disponibles. Así mismo, se realizó una revisión de los radios basados en software disponibles en el mercado con la finalidad de conocer las opciones que se tienen como diseñador de sistemas de comunicaciones. Hoy en día la Universidad de Quintana Roo ya cuenta con radios SDR pertenecientes a la compañía National Instruments. Por lo anterior, fue necesario aprender el lenguaje gráfico de programación LabVIEW y poder definir el entorno de trabajo para realizar la manipulación de los radios. Finalizado lo anterior, se propuso un sistema de comunicaciones base que pueda ser reconfigurado y adaptado a los nuevos requerimientos de transmisión/recepción de datos de los nuevos estándares de comunicaciones.

Durante mi experiencia con el lenguaje LabVIEW y en el manejo de los radios SDR, se tuvieron complicaciones en un principio debido a mi desconocimiento general sobre estas herramientas de diseño, lo cual a medida que el tiempo transcurrió las complicaciones fueron disminuyendo y mejorando mis habilidades para el manejo de estos dispositivos.

Hoy puedo decir, que se cuenta con un documento con información general de los radios SDR y de su manipulación a través del lenguaje gráfico LabVIEW. Así mismo, se cuenta con un sistema base de comunicaciones implementado que puede ser fácilmente modificado para incluir nuevos requerimientos de comunicaciones en un futuro, alcanzando los objetivos deseados en este trabajo. Sin embargo, sería de mucha utilidad el poder adicionar bloques que permitan adquirir archivos de datos o imágenes para su transmisión o recepción. La herramienta desarrollada envía datos de manera aleatoria y desde un principio se deseó esto, ya que el objetivo era cumplir con el desarrollo de un sistema de comunicaciones.

Bibliografía

- [1] S. Sumathi, *LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [2] E. Grayver, *Implementing software defined radio*, New York: Springer, 2013.
- [3] N. Instruments., «Software Defined Radio Device - National Instruments,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212990>.
- [4] WiNRADiO, «MORSRL,» [En línea]. Available: <http://www.morsrl.com/lc-winradio-4.php>.
- [5] S. E. Company, «Radios Definido por Software SpeedNet™ SDR,» [En línea]. Available: <https://www.sandc.com/es/productos-y-servicios/productos/radios-definido-por-software-speednet-sdr/>.
- [6] E. H. Pérez, «Modulación Digital,» de *Comunicaciones II*, México D.F., Limusa, 2009, pp. 119 - 168.
- [7] W. L. Abdeltime M.S. Abdelgader, «Proceedings,» 22-24 Octubre 2014. [En línea]. Available: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf. [Último acceso: 15 mayo 2017].
- [8] N. Instruments, «Radios Definidos por Software,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212990>.
- [9] A. A. R. V. Luis Andres Bolaños Delgado, *Diseño de un algoritmo para el analisis y monitoreo de parametros de señales LTE 4G utilizando la plataforma de radio definida por software(USRP).*, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, 2015.
- [10] M. D. D. Alejandro, *Sistema de Análisis y Registro de datos de espectros en el rango de 50Mhz-2.2Ghz a través de Radio Definido por Software*, Ambato, Ecuador : UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2015.
- [11] N. Instruments, «NI-USRP Instrument Driver Programming Flow,» 2017. [En línea]. Available: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380A-01/usrphelp/programming_flow/.