



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF EN
TVWS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN EN UNA PLATAFORMA DE
RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

AUTOR: ALCOCER ERAZO, JONATHAN DAVID

DIRECTOR: DR. OLMEDO CIFUENTES, GONZALO FERNANDO

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICACIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF EN TVWS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN EN UNA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE” realizado por el señor **JONATHAN DAVID ALCOCER ERAZO**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 22 de Enero del 2019

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Olmedo Cifuentes".

Dr. Olmedo Cifuentes Gonzalo Fernando
DIRECTOR DEL PROYECTO

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **JONATHAN DAVID ALCOCER ERAZO** con cédula de identidad N° 171855261-3 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación, **“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF EN TVWS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN EN UNA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 22 de Enero del 2019

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Jonathan Alcocer Erazo'.

Jonathan David Alcocer Erazo

C.C:171855261-3

AUTORIZACIÓN**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****AUTORIZACIÓN**

Yo, **JONATHAN DAVID ALCOCER ERAZO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación, **“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF EN TVWS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN EN UNA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 22 de Enero del 2019**Jonathan David Alcocer Erazo****C.C:171855261-3**

DEDICATORIA

Quiero dedicar el trabajo de investigación presente a mi familia, quienes a mí lado me acompañan siempre en cada etapa de mi vida.

A mis queridos padres quienes supieron darme siempre su apoyo, guía y ánimo en cualquier circunstancia, y también por todo el amor y los buenos consejos que me han sabido dar para poder seguir adelante en cada situación a lo largo de mis estudios, este proyecto es la cúspide de una etapa de trabajo duro, el cual mediante dedicación y esfuerzo se ha logrado alcanzar este importante logro.

A mi hermano quien ha estado a mi lado y he podido contar con él en todo momento, me ha compartido sus conocimientos en diferentes ámbitos y me ha dado su ayuda siempre que lo he necesitado.

A mis amigos, los cuales durante todos los años de carrera siempre nos hemos apoyado para seguir adelante y que ahora son profesionales de calidad.

Jonathan David Alcocer Erazo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis queridos padres, por su esfuerzo y trabajo para que no me falte nada a lo largo de mis estudios por lo cual son una verdadera inspiración para mí, por confiar en mis capacidades y sueños, además de tener mucha fe en cada una de las metas que en mi vida me he planteado. Por todas sus enseñanzas que me formaron con buenas actitudes y valores. A mi hermano le agradezco por su apoyo incondicional en cualquier momento.

Un agradecimiento personal a mi director de tesis, el Dr. Gonzalo Olmedo por compartir sus conocimientos y experiencias brindadas en el transcurso del proyecto. Así como su dedicación, apoyo y paciencia para poder guiarme en cada etapa y lograr culminar con éxito este trabajo de titulación.

Jonathan David Alcocer Erazo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e Importancia.....	2
1.3. Alcance del Proyecto	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. General.....	5
1.4.2. Específico.....	5
1.5. Contenido del Proyecto	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1. Estándar IEEE 802.11.....	8

2.1.1. Tipos de Estándares IEEE 802.11	9
2.2. Estándar IEEE 802.11af	11
2.2.1. Arquitectura 802.11af	13
2.2.2. Codificación de Canal.....	15
2.2.2.1. Código de Redundancia Cíclica (CRC)	16
2.2.2.2. Código Convolutacional.....	18
2.2.3. Modulaciones Digitales	19
2.2.4. Modulación OFDM.....	21
2.3. TV White Space (TVWS).....	23
2.4. Radio Definido por Software.....	26
2.4.1. USRP-2920	26
2.4.1.1. Tarjeta Madre FPGA.....	28
2.4.1.2. Tarjeta Hija SBX.....	29
2.4.1.3 Arquitectura.....	30
2.4.1.4 Conectores y Panel Frontal del USRP.....	31
2.4.1.5. Conexión con el USRP-2920	33
2.4.2. Software	34
2.4.2.1 GNU Radio.....	34
CAPÍTULO 3.....	37
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF	37
3.1 Arquitectura del Sistema	39
3.2 Diseño e Implementación del Transmisor	42
3.2.1 Datos de Entrada.....	42
3.2.2 Codificación de Canal.....	45

3.2.3 Modulación Digital	46
3.2.4 Modulación OFDM.....	48
3.2.5 Salida del Transmisor	50
3.3 Diseño e Implementación del Receptor.....	53
3.3.1 Entrada del Receptor.....	54
3.3.2 Demodulación OFDM	56
3.3.3 Demodulación Digital.....	59
3.3.4 Decodificación de Canal	60
3.3.5 Datos de Salida	60
CAPÍTULO 4.....	64
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
4.1. Implementación del Sistema.....	64
4.2. Velocidad de transmisión	67
4.3. Tasa de Error de Bit (BER)	69
4.3. Distancia del enlace	72
4.4. Comparación entre el Transmisor y Receptor	76
CAPÍTULO 5.....	79
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5.1. Conclusiones.....	79
5.2. Recomendaciones	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros de la Capa Física</i>	14
Tabla 2 <i>Características de la Modulación</i>	20
Tabla 3 <i>Tipos de Modulaciones Digitales</i>	20
Tabla 4 <i>Especificaciones Técnicas de los computadores</i>	40
Tabla 5 <i>Propiedades de los bloques de datos de entrada</i>	43
Tabla 6 <i>Propiedades de los bloques de codificación de canal</i>	46
Tabla 7 <i>Propiedades de los bloques de modulación digital</i>	47
Tabla 8 <i>Propiedades de los bloques de la modulación OFDM</i>	49
Tabla 9 <i>Propiedades del bloque a la salida del transmisor</i>	50
Tabla 10 <i>Propiedades del bloque a la entrada del receptor</i>	54
Tabla 11 <i>Propiedades del bloque Schmidl & Cox OFDM synch.</i>	56
Tabla 12 <i>Propiedades del bloque Header/Payload Demux</i>	57
Tabla 13 <i>Propiedades de los bloques de Demodulación OFDM</i>	57
Tabla 14 <i>Propiedades del bloque de la demodulación digital</i>	59
Tabla 15 <i>Propiedades del bloque de la decodificación de canal</i>	60
Tabla 16 <i>Propiedades del bloque de los datos de salida</i>	61
Tabla 17 <i>Velocidad de transmisión</i>	67
Tabla 18 <i>Evaluación del BER en BPSK</i>	70
Tabla 19 <i>Evaluación del BER en QPSK</i>	71
Tabla 20 <i>Evaluación del BER en 16-QAM</i>	71
Tabla 21 <i>Evaluación de la distancia vs el BER en las modulaciones</i>	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo OSI	8
Figura 2 Frecuencias de los estándares 802.11	9
Figura 3 Características de los estándares 802.11	11
Figura 4 Red TVWS incluyendo el estándar 802.11af	12
Figura 5 Interpretación del CRC en un mensaje	16
Figura 6 Cálculo de CRC	17
Figura 7 Registro de desplazamiento de una secuencia de entrada	19
Figura 8 Señal OFDM	21
Figura 9 Símbolo OFDM con CP	22
Figura 10 Espacios en blanco	24
Figura 11 Bandas de operación de TVWS	25
Figura 12 Ejemplo de un equipo SDR	26
Figura 13 USRP	27
Figura 14 Niveles del USRP	28
Figura 15 Tarjeta madre del USRP	29
Figura 16 Tarjeta secundaria del USRP	30
Figura 17 Arquitectura de SDR	31
Figura 18 Panel frontal del USRP-2920	32
Figura 19 Antena VERT400 de USRP-2920	32
Figura 20 Tipos de conexión con el USRP-2920	33
Figura 21 Interfaz de GNU Radio	34
Figura 22 Entorno de GNU Radio Companion	35
Figura 23 Propiedades de los bloques	36
Figura 24 Diagrama de bloques del diseño en general	37
Figura 25 Frecuencias en el espectro radioeléctrico	38
Figura 26 Escenario general del sistema	39
Figura 27 Arquitectura implementada del sistema	40
Figura 28 Error de conexión GNU Radio Companion	41
Figura 29 Diseño del transmisor	42

Figura 30 Bloques de los datos de entrada en GNU Radio.....	42
Figura 31 Gráfica de los paquetes transmitidos	44
Figura 32 Gráfica en frecuencia de la fuente	44
Figura 33 Bloques de la etapa de codificación de canal	45
Figura 34 Bloques de la etapa de modulación digital	46
Figura 35 Gráfica del diagrama de constelación BPSK.....	47
Figura 36 Gráfica del bloque Tagged Stream Mux en el dominio de frecuencia	48
Figura 37 Bloques de la etapa de modulación OFDM.....	48
Figura 38 Bloques de la etapa de salida del transmisor	50
Figura 39 Gráfica de la señal de salida en el dominio del tiempo	51
Figura 40 Gráfica de la señal de salida en el dominio de la frecuencia	51
Figura 41 Diagrama completo del transmisor en GNU Radio	53
Figura 42 Diseño del receptor	53
Figura 43 Bloques de la etapa de la entrada del receptor.....	54
Figura 44 Gráfica a la entrada del receptor	55
Figura 45 Gráfica a la entrada del receptor en dominio del tiempo.....	55
Figura 46 Primera etapa de la demodulación OFDM	56
Figura 47 Bloque Header/Payload Demux	56
Figura 48 Bloques de la etapa de Demodulación OFDM	57
Figura 49 Gráfica a la salida de la demodulación OFDM	59
Figura 50 Bloque de la etapa de demodulación digital	59
Figura 51 Bloques de la decodificación de canal.....	60
Figura 52 Bloques de la etapa de Datos de Salida	60
Figura 53 Gráfica a la salida del receptor en el dominio del tiempo	61
Figura 54 Gráfica de los paquetes recibidos	62
Figura 55 Diagrama completo del receptor en GNU Radio.....	63
Figura 56 Entorno del sistema.....	64
Figura 57 Frecuencias de operación de servicios VHF y UHF.....	65
Figura 58 Parámetros a configurar en la interfaz	66
Figura 59 Parámetros a configurar en la interfaz	67

Figura 60 Diagrama de envío y recepción de datos	69
Figura 61 Panel de consola en el Computador Rx	69
Figura 62 Pérdida de un paquete en el Computador Rx.....	70
Figura 63 Diagrama de pruebas en factor de distancia	72
Figura 64 Distancia vs BER.....	74
Figura 65 Distancia mínima de prueba entre el transmisor y el receptor.....	74
Figura 66 Distancia de prueba de 8m entre el transmisor y el receptor	75
Figura 67 Distancia de 16 m entre el transmisor y el receptor.....	75
Figura 68 Paquetes enviados en el transmisor y ejecución del programa.....	76
Figura 69 Paquetes recibidos en el receptor y ejecución del programa	77
Figura 70 Gráfica de los paquetes transmitidos y recibidos	77
Figura 71 Gráfica de la señal de entrada del Tx y de la salida del Rx	78
Figura 72 Gráfica de la señal Tx y Rx sobrepuestas	78

RESUMEN

El presente proyecto describe el diseño e implementación de un sistema Wi-Fi en TVWS (en inglés, *TV White Space*) basado en el estándar IEEE 802.11af, que permite la operación de una red inalámbrica en una plataforma de Radio Definido por Software, mediante la utilización de equipos USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*), el cual consta de un computador y software de radio de alto rendimiento para el procesamiento integral de cualquier tipo de onda. Este estándar 802.11af permite la operación de una red de área local inalámbrica usando los espacios blancos no usados de la banda de TV de VHF y UHF en el espectro radioeléctrico, cuyo rango de operación se encuentra entre los 54 MHz y 790 MHz. Además para la implementación del proyecto se estimó las distintas funciones incorporadas en *firmwares* de programación, por lo que se utiliza GNU Radio, que es una herramienta de desarrollo que proporciona los bloques de procesamiento de señales para la implementación de sistemas de Radio Definido por Software, el cual se utilizó para el diseño de un transmisor y un receptor Wi-Fi basándose en los algoritmos que utiliza el estándar. Finalmente, con el sistema implementado se realizó un análisis del desempeño de la red inalámbrica basado en el estándar 802.11af mediante pruebas de funcionamiento para determinar varios parámetros, como la velocidad de transmisión, BER y la distancia.

PALABRAS CLAVES:

- **TVWS**
- **USRP**
- **GNU RADIO**
- **ESPECTRO RADIOELÉCTRICO**

ABSTRACT

This project describes the design and implementation of a TVWS Wi-Fi system (TV White Space) for IEEE 802.11af standard, that allows the operation of a wireless network in a Software Defined Radio platform, through the use of USRP equipment (Universal Software Radio Peripheral), which will allow the use of a computer as a high performance radio software for the integral processing of any type of wave. The 802.11af allows the operation of a wireless local area network using the unused blank spaces of the VHF and UHF TV band in the radio spectrum, whose operating range is between 54 MHz and 790 MHz. For the implementation of the project, the different functions incorporated into programming firmware were estimated, which is why GNU Radio is used, which is a development tool that supplies signal processing blocks for the implementation of Software Defined Radio systems, which was used to design the Wi-Fi transmitter and receiver based on the different algorithms of the standard. Finally, with the implemented system, an analysis of the performance of the wireless network based on the 802.11af standard was performed through performance tests to determine the transmission speed, BER and distance.

KEY WORDS:

- **TVWS**
- **USRP**
- **GNU RADIO**
- **RADIO SPECTRUM**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Inspirado por el avance de las regulaciones sobre los espacios en blanco de televisión TVWS (en inglés, *TV White Space*), cuyo término *White Space* es utilizado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) para hacer reseña al espectro no usado en la banda de televisión, el estándar IEEE 802.11 formó una nueva extensión de Wi-Fi tradicional a TV White Space (TVWS). La implementación Wi-Fi en TVWS brinda una distancia mayor, obteniendo una similar experiencia de usuario de los sistemas Wi-Fi habituales. Además, se considera como una de las más novedosas tecnologías para el mercado procedente de las nuevas regulaciones de bandas VHF y UHF. (Cuevas, 2017).

La televisión abierta tiene una cobertura que se organiza de modo que deja ciertos espacios libres en el área de cobertura de los transmisores que manejan los distintos canales de TV, de tal manera que no cause interferencia. Por lo cual se logran aprovechar estos espacios blancos dentro del espectro para el uso de aplicaciones Wi-Fi y dado que usan baja potencia no se tendrá temor a que se produzcan interferencias en el área de cobertura televisora (Hernández & Carro, 2016).

Es importante recalcar que algunas de las ventajas en la implementación del estándar 802.11af es que debido a trabajar a bajas frecuencias entre 54 MHz a 790 MHz, las condiciones en la propagación de la señal mejoran, lo que causa una distancia mayor de cobertura en comparación con los demás estándares de la familia IEEE.802.11, además se tiene una mejor propagación en zonas con edificaciones y relieves complicados, por lo que resulta que estos sistemas sean más tolerantes a obstáculos entre transmisor y receptor (Mohammed, 2012).

1.2. Justificación e Importancia

Últimamente, muchos países empezaron a reemplazar la tecnología actual de televisión analógica por la televisión digital (DTV). La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ubicada en Estados Unidos procedió la transición a DTV con éxito el 12 de junio de 2009. Como resultado, los radiodifusores dejaron de usar algunas partes del espectro de radio utilizado por la TV analógica. Los reguladores han comenzado iniciativas para lograr abrir parte del espectro de televisión de radiodifusión no utilizado en bandas de VHF y UHF para sistemas de comunicación inalámbrica (Zhou, 2013). En Ecuador las bandas de frecuencias analógicas todavía se encuentran en uso por diferentes servicios pero existen algunas frecuencias en el espectro que no son utilizadas.

Diversos estándares basados en el principio de redes de radio cognitiva (CR) como son 802.11af, 802.19 y 802.22 están capacitadas para poder trabajar en dichas frecuencias libres. Todos estos diversos estándares se utilizan en la TVWS, pero cada uno de estos tiene sus características que los distinguen (ancho de banda, potencia de transmisión, diversas arquitecturas de sistemas y clases de dispositivos) (Lekomtcev, 2015).

Por tanto, se procura reducir dichos espacios en blanco en el espectro reutilizándolo para distintas aplicaciones a través de redes inalámbricas. Los espacios en blanco dentro del espectro de la banda de televisión analógica son muy frecuentes entre las estaciones en cualquier área geográfica, ya que esto evita que se produzca interferencia de canal adyacente entre las transmisoras de alta potencia (Campoverde & Arizaga, 2017).

La reutilización de los espacios en blanco del espectro tiene como objetivo involucrar la banda ancha de las redes Wi-Fi. Debido a esto ha surgido el concepto de TVWS, el cual ofrece poder desarrollar nuevas redes inalámbricas utilizando los espacios blancos en el espectro de la

televisión analógica, por motivo de que las redes están creciendo de manera abrumadora (Campoverde & Arizaga, 2017).

Los mercados de comunicaciones IoT (en inglés, *Internet of things*) y M2M (en inglés, *machine to machine*) solicitan estándares de redes inalámbricas que puedan operar en las bandas UHF y VHF debido a que son las bandas de frecuencias que se utilizan en la transmisión de los canales de televisión analógica, ofreciendo así una operación de baja potencia y larga distancia. También se tiene la necesidad de aplacar el excesivo uso de datos a la red celular producidas por la utilización de dispositivos electrónicos y celulares. El objetivo del estándar 802.11af es resolver estos desafíos al proporcionar una experiencia similar a estar usando una conexión Wi-Fi convencional, alcanzando velocidades de transmisión de datos razonables y logrando una distancia de cobertura de un kilómetro a través del uso de las bandas de las frecuencias libres en el espectro (Arteaga, 2016).

Otra investigación importante se describe en el artículo desarrollado por Cárdenas y Navarro (2017), con el tema “Implementación de sistema de comunicación inalámbrica usando GNU Radio y USRP” (Cardenas & Navarro, 2017). En el que describe que las tecnologías de comunicación de hoy en día siguen avanzando continuamente en su cambio de analógica a digital, más funciones de los sistemas se están implementando en software en vez de hardware, por lo que la tecnología de radio definido por software últimamente ha permitido significativos avances en el desarrollo de prototipos para las comunicaciones inalámbricas (Cardenas & Navarro, 2017).

Teniendo en cuenta que en el futuro, Ecuador podría dejar completamente el uso de la televisión analógica para pasar en su totalidad a la televisión digital, es importante trabajar en el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica utilizando las bandas de frecuencia VHF y

UHF, las cuales son usadas actualmente en la televisión analógica, logrando establecer sistemas de redes Wi-Fi.

En este proyecto se realizó el análisis de desempeño de una red en la frecuencia de 611,13 MHz en la banda de UHF en la cual se implementa el estándar IEEE 802.11af para determinar la eficiencia que tiene el uso de bandas de frecuencia que son hoy en día usadas en la televisión analógica como son la bandas VHF y UHF otorgadas por la Arcotel, para así llegar a reutilizarlas en la implementación de sistemas inalámbricos. Dado que en la actualidad las personas están dedicadas a usar gran cantidad de dispositivos que necesitan conectarse a internet por lo que las frecuencias altas (GHz) en su mayoría se encuentran ocupadas y dado que el estándar 802.11af tiene un mayor alcance de propagación en comparación a otros estándares, por las frecuencias usadas será de utilidad para lograr conectar dentro de una misma red varios dispositivos lejanos.

1.3. Alcance del Proyecto

En este trabajo se implementó un sistema Wi-Fi basado en el estándar 802.11af, el cual consta de la utilización de las bandas de frecuencias TVWS en el espectro radioeléctrico, exactamente la frecuencia de 611,13 MHz en la banda de UHF, mediante el uso de los USRP del laboratorio de TV Digital y el uso del software GNU Radio, con lo que se procede a la utilización de las diversas normas que contiene el estándar para lograr la implementación de un transmisor y receptor Wi-Fi en los espacios en blanco de TV.

La reutilización de las bandas de frecuencia VHF y UHF es un tema importante, dado que en algunos años las frecuencias bajas de la televisión analógica quedarán sin uso, por lo cual es recomendable usar dichas frecuencias para el desarrollo de nuevas tecnológicas, o en este caso el uso del estándar 802.11af que es una gran opción para las aplicaciones que se relacionen con el

internet de las cosas, que permite interactuar con objetos físicos en una red inalámbrica de largo alcance debido a que trabaja a frecuencias bajas (MHz), siendo algo más inmune a interferencias.

Posteriormente a la implementación del transmisor y receptor basados en el estándar 802.11af se analizó el desempeño de la red mediante pruebas de funcionamiento como la velocidad de transmisión, distancia y el BER.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Diseñar e implementar un sistema Wi-Fi en TVWS basado en el estándar IEEE 802.11af a través de una plataforma de radio definido por software para el análisis del desempeño de una red inalámbrica.

1.4.2. Específico

- Investigar las características de los equipos USRP-2920 para la elaboración del sistema.
- Investigar las diferentes funcionalidades de GNU Radio que permitirá desarrollar los bloques para el procesamiento de señales.
- Comparar las características de los diversos estándares IEEE 802.11 y entender las diferencias con el estándar IEEE 802.11af.
- Realizar la programación para implementar un transmisor y un receptor de un sistema Wi-Fi basado en las características del estándar IEEE 802.11af mediante radio definida por software.
- Analizar el desempeño de la red mediante medidas de calidad como son la velocidad de transmisión, el BER y el área de cobertura.

1.5. Contenido del Proyecto

Este proyecto de investigación está conformado por cinco capítulos, que se detallan a continuación:

Capítulo 1. *Introducción:* En este capítulo se procede a detallar los antecedentes, justificación e importancia, el alcance del proyecto y los objetivos que se desea alcanzar en el proyecto, además se da un breve detalle del contenido de los capítulos que conforman el presente trabajo.

Capítulo 2. *Fundamento Teórico:* Se realizó la investigación para obtener información acerca del estándar 802.11af, para conocer sus características y sus principales ventajas, así como comprender como se encuentra conformada su estructura. El objetivo es entender su funcionamiento y cuáles son los requerimientos para su implementación en redes inalámbricas mediante la utilización de las bandas de frecuencia TVWS. Se investigó las funcionalidades e instalación acerca de GNU Radio para lograr el desarrollo del proyecto. Para finalizar se investigó acerca del uso del equipo USRP-2920 para comprender su funcionamiento.

Capítulo 3. *Diseño e Implementación del Sistema:* Se realizó el diseño y programación del sistema Wi-Fi utilizando la arquitectura del estándar 802.11af en la banda de frecuencia de 611,13 MHz en TVWS, para lo cual se implementó a través de GNU Radio. Además se detalla los diferentes bloques de procesamiento realizados en GNU Radio utilizados en conjunto con los equipos USRP para lograr implementar un transmisor y receptor basados en el estándar 802.11af.

Capítulo 4. *Análisis de Resultados:* En este capítulo se realizó un análisis de desempeño del estándar 802.11af implementado mediante pruebas de funcionamiento del sistema, para así lograr obtener información suficiente para analizar los diferentes parámetros de la red como su velocidad

de transmisión, ancho de banda, el área de cobertura, la tasa de bit erróneo y la frecuencia, para de esta manera llegar a determinar los parámetros que influyen en el desempeño de la red y la eficiencia.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones: En el capítulo final se trata las conclusiones y recomendaciones obtenidas después del análisis de resultados obtenidos acerca del desempeño de la red, así como el programa desarrollado, además de algunas propuestas de trabajos futuros en que puede encaminarse la utilización del estándar 802.11af.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Estándar IEEE 802.11

IEEE 802.11 es un estándar que define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN). El estándar 802.11 define el uso de los dos niveles inferiores del modelo OSI, la capa física (PHY) y la capa de enlace de datos, como se observa en la figura 1.

La primera versión del estándar 802.11 fue publicada en 1997 que define dos velocidades de transmisión teóricas de 1 y 2 Mbps que se logran transmitir por señales infrarrojas (IR) en la banda de 2,4 GHz. Este estándar define el protocolo de múltiple acceso por detección de portadora evitando colisiones (CSMA/CA) como método de acceso (Yunquera, 2012).

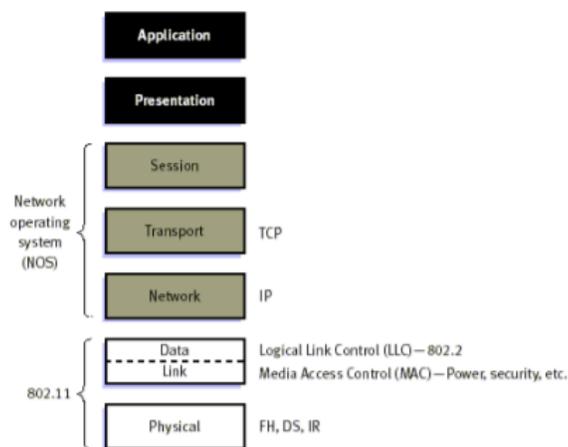


Figura 1. Modelo OSI

Fuente: (Arreaga, 2015)

El estándar IEEE 802.11 ha ido evolucionando con el transcurso de los años, cada tipo de estándar se diferencia por una letra que acompaña al final del término 802.11.

Cada uno de los estándares ha puesto un avance con respecto al anterior, ya sea en la mejora de velocidad o en el alcance.

2.1.1. Tipos de Estándares IEEE 802.11

A continuación se describe brevemente los principales estándares de la familia IEEE 802.11 más utilizados:

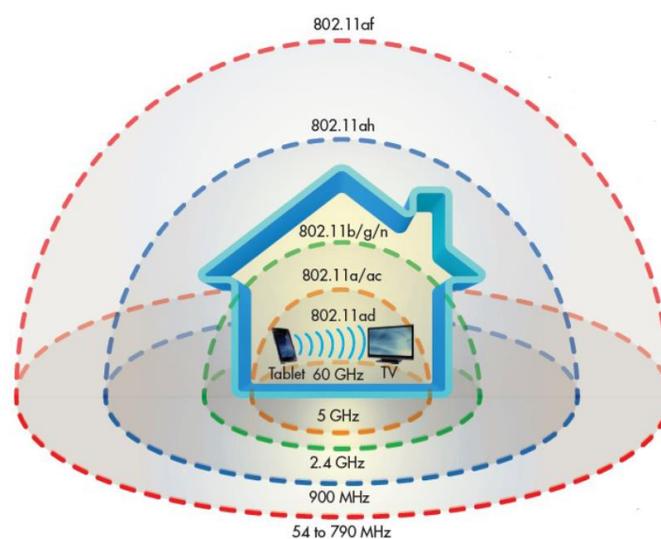


Figura 2. Frecuencias de los estándares 802.11

Fuente: (Arteaga, 2016)

- **Estándar 802.11ah:** Conocido como Wi-Fi HaLow, su funcionamiento es en bandas de frecuencias menores a 1 GHz, este estándar no incluye las bandas de TVWS. El objetivo son las redes con un rango mayor en el espacio de las frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz con velocidades hasta 347 Mbps.
- **Estándar 802.11ad:** Cuenta con velocidades rápidas de hasta 6,76 Gbps, utiliza la frecuencia de 60 GHz, pero la desventaja es la distancia de 3,3 m que cubre desde el punto de acceso.

- **Estándar 802.11ac:** Su funcionamiento está en la frecuencia de 5 GHz, usa un sistema MIMO para lograr reducir los errores y aumentar su velocidad de datos cuyo valor es de 3,46 Gbps.
- **Estándar 802.11n:** Utiliza las frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz, tiene una velocidad de 600 Mbps, es un estándar que usa el término de banda dual para poder transmitir datos a través de las dos frecuencias que utiliza.
- **Estándar 802.11g:** Puede alcanzar una velocidad de 54 Mbps y su frecuencia de operación es 2,4 GHz, se cataloga como el sucesor del 802.11b
- **Estándar 802.11a:** Su funcionamiento está ubicado en la frecuencia de 5 GHz cuya velocidad es 54 Mbps.
- **Estándar 802.11b:** Funciona en frecuencia de 2,4 GHz y cuenta con una velocidad de 11 Mbps.
- **Estándar 802.11af:** Utiliza las frecuencias de TVWS entre las bandas VHF y UHF, cuyas frecuencias comprenden entre los 54 MHz a 790 MHz. Su velocidad puede llegar 26,7 Mbps.

En la figura 3 se puede observar un breve resumen de algunas características de los estándares.

Standard	Frequency Band	Bandwidth	Modulation Scheme	Channel Arch.	Maximum Data Rate	Range	Max Transmit Power
802.11	2.4 GHz	20 MHz	BPSK to 256-QAM	DSSS, FHSS	2 Mbps	20 m	100 mW
b	2.4 GHz	21 MHz	BPSK to 256-QAM	CCK, DSSS	11 Mbps	35 m	100 mW
a	5 GHz	22 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	54 Mbps	35 m	100 mW
g	2.4 GHz	23 MHz	BPSK to 256-QAM	DSSS, OFDM	54 Mbps	70 m	100 mW
n	2.4 GHz, 5 GHz	24 MHz and 40 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	600 Mbps	70 m	100 mW
ac	5 GHz	20, 40, 80, 80+80=160 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	6.93 Gbps	35 m	160 mW
ad	60 GHz	2.16 GHz	BPSK to 64-QAM	SC, OFDM	6.76 Gbps	10 m	10 mW
af	54-790 MHz	6, 7, and 8 MHz	BPSK to 256-QAM	SC, OFDM	26.7 Mbps	>1km ?	100 mW
ah	900 MHz	1, 2, 4, 8, and 16 MHz	BPSK to 256-QAM	SC, OFDM	40 Mbps	1 km	100 mW

Figura 3. Características de los estándares 802.11

Fuente: (McCann & Ashley, 2019)

2.2. Estándar IEEE 802.11af

El estándar 802.11af es conocido también como White-Fi, es un estándar mejorado para el acceso inalámbrico a internet, el cual permite que una red de área local inalámbrica (WLAN) funcione mediante el uso de TVWS (en inglés, *TV White Space*) que hace referencia al espectro radioeléctrico no usado en la televisión analógica, este estándar fue desarrollado en febrero del 2014, el cual utiliza las bandas de baja frecuencia de VHF y UHF, las cuales trabajan en el rango de 54 MHz a 790 MHz. Este tipo de tecnología permite transmitir en las bandas libres dentro de los canales de TV (Mares, 2015).

La utilización de las frecuencias bajas en el orden de los MHz, dentro del espectro radioeléctrico tiene como resultado que la señal logre obtener una mayor distancia y pueda penetrar

obstáculos mucho mejor que los otros estándares 802.11 que se encargan de utilizar las frecuencias altas de 2,4 y 5 GHz. Además para evitar las interferencias de transmisión, los dispositivos que implementan el estándar 802.11af deben utilizar una base de datos con los espacios en blanco que se encuentran ubicadas en las bandas de televisión (Beltran, 2016), como se observa en la figura 4.

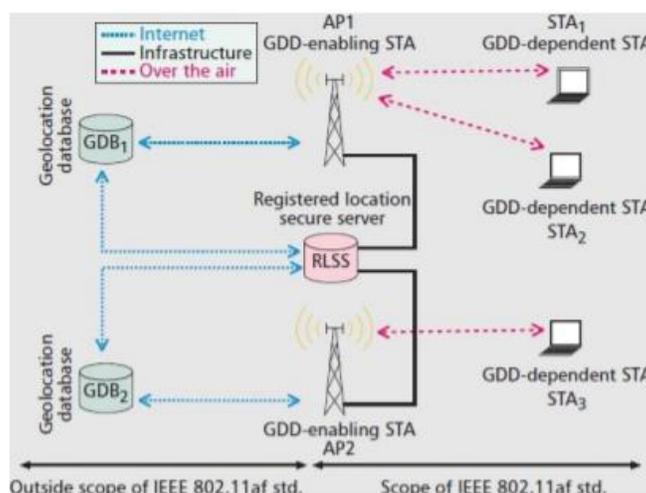


Figura 4. Red TVWS incluyendo el estándar 802.11af

Fuente: (Beltran, 2016)

Se utiliza bases de datos de Geolocalización (GDB) como elemento primario y por el cual se diferencia el estándar 802.11af de los demás estándares 802.11, el GDB almacena por localización geográfica las frecuencias disponibles. El servidor de seguridad de la Localización Registrada (RLSS) opera como una base de datos local que contiene la localización geográfica y los parámetros operativos de un número de conjuntos de servicios básicos (BSS). El RLSS va a distribuir los parámetros a los puntos de acceso (AP) y estaciones (STA). Las entidades dependientes de la GDB (GDD) especifican que su operación está controlada por una GDB autorizada. Además las STA establecen una comunicación bidireccional inalámbrica con el AP dentro de cualquier banda de TVWS (Beltran, 2016).

La televisión abierta tiene una cobertura que se organiza de tal manera que genera espacios entre las áreas de cobertura que producen los transmisores los cuales usan los mismos canales, por lo que se evita que se produjeran interferencias. Algunas de las ventajas de trabajar a bajas frecuencias (MHz) es que las condiciones en que la señal se propaga mejoran, por lo que la propagación en relieves más complicados o dentro de edificaciones se incrementa, otorgando un sistema más tolerante a los diferentes obstáculos que pueden llegar a producirse entre el transmisor y receptor. Otra de las ventajas es que se obtiene un mayor rango de cobertura y la velocidad de la red va ser mayor a otros Wi-Fi tradicionales (Mares, 2015).

La televisión analógica cuenta con canales que disponen de frecuencias inferiores a 1 GHz y que cuenta cada una con espacio de guarda que ayudan a evitar que un canal produzca interferencia con el próximo. Por lo que White-Fi ocupa los espacios que se encuentran libres entre los canales para obtener un ancho de banda que logre transmitir datos a velocidades mayores (Pelechano, 2013).

2.2.1. Arquitectura 802.11af

El estándar 802.11af tiene una capa física (PHY) que está basado en la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), la pérdida de propagación así como la atenuación por materiales densos como el ladrillo es mucho menor debido a que usa frecuencias bajas de las bandas VHF y UHF a diferencias de las bandas de frecuencias altas de 2,4 GHz y 5 GHz (Yera, 2015).

Las características del estándar 802.11af es que utiliza 114 subportadoras para la implementación de OFDM, además ocupa canales con un ancho de 6, 7 y 8 MHz. Se pueden unir hasta cuatro canales o dos bloques contiguos. Así también la operación MIMO es posible con hasta cuatro corrientes usadas para código del bloque del tiempo espacial (STBC) o para operación

multiusuario (MU-MIMO). La velocidad de transferencia de datos máxima que se puede obtener por flujo espacial es de 26,7 Mbps para los canales de 6 y 7 MHz y de 35,6 Mbps para los canales de 8 MHz, si se utilizan cuatro flujos espaciales la velocidad de transferencia máxima es de 426,7 Mbps para los canales de 6 y 7 MHz y de 568,9 Mbps para canales de 8 MHz (Flores, Guerra, & Knightly, 2013).

Según entornos regulatorios para la utilización de dispositivos sin licencia en canales indicados como disponibles, la operación de los espacios en blanco de TV está permitida en canales de ancho de banda de 6 MHz en EE.UU dentro de las frecuencias de 54 a 698 MHz, para Europa se permite la operación de canales de 8 MHz dentro de las frecuencias de 470 a 790 MHz, y en Ecuador según Arcotel se permite la operación de canales de 6 MHz en las frecuencias de 54 a 698 MHz (Beltran, 2016).

En la tabla 1 se describe los parámetros de la capa física que ocupa el estándar 802.11af.

Tabla 1

Parámetros de la Capa Física

Modulación	OFDM
Modulación Digital	BPSK, QPSK, 16-QAM
Tasa de Código Convolutional	1/2, 3/4
Tamaño de la FFT (Transformada de Fourier rápida)	128
Ancho de Banda del Canal BW (MHz)	6, 7 y 8
Duración del Intervalo de Guarda (us)	3, 6
# Subportadoras OFDM total	114
# Subportadoras útiles	-58 a -2 y 2 a 58 con índice 0 en DC
Índices piloto	± 11 , ± 25 y ± 53

2.2.2. Codificación de Canal

La codificación de canal tiene como objetivo de detectar y corregir errores, de tal forma que haga posible volver a reconstruir la secuencia de datos de una forma fiable. Existen dos métodos para lograr corregir los errores:

- Detección de errores hacia atrás o ARQ (en inglés, *Automatic Repeat Request*): Este método consiste en que cuando el receptor logre detectar un error, tiene que solicitar al transmisor una repetición del bloque de los datos enviados. Así el transmisor podrá retransmitir los datos las veces que sea posible hasta que logren llegar los datos sin ningún error.
- Corrección de errores hacia adelante o FEC (en inglés, *Forward Error Correction*): Este método utiliza códigos auto correctores que van a poder realizar la corrección de dichos errores en el receptor (Martínez & Calvo, 2008).

En el estudio de los sistemas digitales existes dos razones por las que se genera un deterioro en la señal recibida, la primera es por causa del ruido generado por el propio canal, la segunda razón se da por el ruido de cuantificación dado por la codificación que se añade sin poder evitarlo en el emisor y que viaja por todo el sistema de comunicación hasta llegar al receptor. En cualquier transmisión de datos en general él envió de datos debe ser lo más parecido posible tratando de no perder ningún tipo de dato ya que esto consiste pérdida de información del usuario. Para lo cual se tiene que proceder a utilizar diversos tipos de codificación de canal para de esa manera lograr que la información enviada sea recibida sin ninguna pérdida de información (Vega, 2015).

2.2.2.1. Código de Redundancia Cíclica (CRC)

Es un método de control de integridad de datos de fácil implementación, es el principal método de detección de errores utilizado en las telecomunicaciones. Se usa para la detección de errores, que generalmente se implementa en el uso de redes digitales y en varios dispositivos para lograr detectar si existe alguna manipulación en los datos. (Villagómez, 2017).

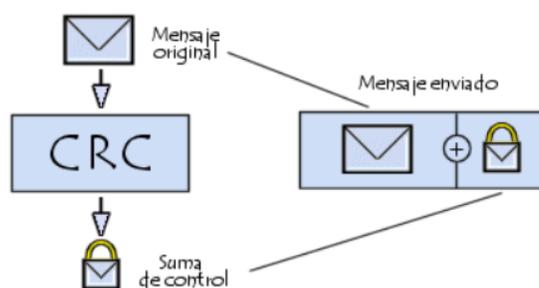


Figura 5. Interpretación del CRC en un mensaje
Fuente: (Villagómez, 2017)

El código de CRC es muy usado porque su implementación en hardware es simple, además de ser sencillos de analizar matemáticamente y ser seguros para detectar errores provocados por ruido en canales de emisión.

Para calcular el código de redundancia de alguna trama con m bits, correspondiente al polinomio $M(x)$, la trama deberá ser más grande que el polinomio generador. La idea básica consiste en incluir un código de redundancia al final de la trama de tal manera que el polinomio representado por la trama con el código de redundancia sea divisible por $G(x)$. Cuando el receptor recibe la trama de suma comprobada, intenta dividirla entre $G(x)$. Si existe un resto, habrá ocurrido un error de transmisión (Castillo, 2014).

El algoritmo para calcular la redundancia es el siguiente:

- Sea r el grado de $G(x)$. Agregar r bits a cero al extremo de orden inferior de la trama, de tal manera que ahora contenga $(m + r)$ bits, y corresponda al polinomio $x^r M(x)$.
- Dividir la serie de bits correspondientes a $x^r M(x)$ entre la serie de bits correspondientes a $G(x)$, empleando la división en módulo 2.
- Restar el resto (que siempre tiene r o menos bits) de la serie de bits correspondientes a $x^r M(x)$, empleando la resta en módulo 2. El resultado es la trama lista para transmitir.

Llámesese $T(x)$ a este polinomio.

En la figura 6 se ilustra el cálculo para la trama 1101011011 y $G(x) = x^4 + x + 1$

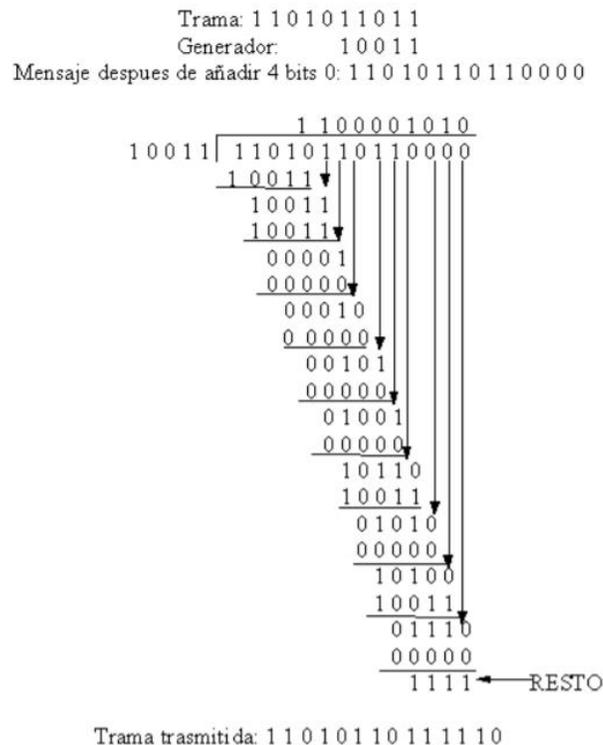


Figura 6. Cálculo de CRC

Fuente: (Castillo, 2014)

De esta manera, la secuencia de bits con menos peso es aquella que se encuentra más a la derecha, representa el grado 0 del polinomio ($x^0 = 1$), el 4° bit de la derecha representa el grado 3 del polinomio (x^3), y así sucesivamente. El remitente, para comenzar el mecanismo de detección de errores, ejecuta un algoritmo en los bits de la trama, de forma que se genere un CRC, y luego transmite estos dos elementos al destinatario. El destinatario realiza el mismo cálculo a fin de verificar la validez del CRC. El polinomio generador más usado en los estándares 802.11 es el CRC32 que da una protección extra sobre los demás polinomios. (Castillo, 2014)

2.2.2.2. Código Convolutional

Los códigos convolucionales se refieren a códigos lineales en donde se realiza la suma de dos palabras de código y como resultado entrega otra palabra de código, cabe recalcar que se diferencian de los códigos por bloque por su forma estructural y la propiedad para lograr corregir errores, además cuentan con memoria dado que la codificación dependerá de los datos que se envían en el momento y los datos que fueron enviados anteriormente. Un código convolutional se especifica por tres parámetros: el número de entradas (k), el número de salidas (n) y la memoria del código (m), de esta manera se puede obtener mediante la siguiente ecuación (1) la tasa de código (Martino, 2012).

$$R = \frac{k}{n} \quad (1)$$

Por ejemplo, se tiene un código convolutional con número de entradas $k=1$, número de salidas $n = 2$ y número de registros $m = 3$, por lo tanto si se aplica la ecuación (1) se obtiene que la tasa de codificación es $R = 1/2$. En la figura 7 se observa el registro de desplazamiento de la secuencia de entrada en el sistema.



Figura 7. Registro de desplazamiento de una secuencia de entrada

Fuente: (Martino, 2012)

Por ejemplo si se tiene como entrada un 1 entonces entraría en el registro S_1 y teniendo en cuenta que los registros inicializan en 0, por lo tanto realizando la suma de los registros para obtener las dos salidas se tendría que la salida 1 sería $1+0=1$ y la salida 2 sería $1+0=1$, por lo que la secuencia de entrada codificada sería 11, y como se observa en la figura 7 se tiene dos bits de salida.

La codificación convolucional es un método basado en la corrección de errores, más útiles en canales en donde la señal que se transmite se pudiera llegar a deteriorarse por ruido gaussiano blanco (AWGN), en donde se emplea para la decodificación el método de Viterbi. (Jimenez, 2013).

2.2.3. Modulaciones Digitales

Realizar la modulación de una señal consiste en modificar sus características para llevar la información que se quiere transmitir, llamada señal moduladora, según las características de otra señal conocida como portadora. Algunos de los principales efectos que sufre una señal al momento de transmitir son la atenuación, ruido blanco, desvanecimiento e interferencias. Por lo cual al momento de modular una señal se puede obtener las siguientes características de la tabla 2:

Tabla 2*Características de la Modulación*

Principales Características de la Modulación
Mayor eficiencia espectral.
Menos sensibilidad ante las interferencias.
Reducir la atenuación al instante de transmitir las señales.
Mejorar la calidad de la información al momento de transmitir.
Proteger ante interferencias de ruido la información.

Fuente: (Hernandez, 2008)

La modulación digital se encarga de convertir los bits de datos que se quiere enviar en señales que ayuden a transmitir los datos enviados pero con la menor cantidad de errores, estas señales son grupos de bits que se transmitió y toman el nombre de símbolos. El tiempo de un símbolo se define como T_s que será igual a $1/B$, donde B es el ancho de banda del canal, además se tiene que un tiempo de bit $T_b[s]$ es igual a T_s/k ; donde k viene siendo el número de bits. A continuación se procede a ver algunos de los tipos de modulaciones digitales (Hernandez, 2008).

En la tabla 3 se procede a observar algunos de los tipos de modulaciones digitales:

Tabla 3*Tipos de Modulaciones Digitales*

Modulaciones	# Símbolos	Desfase entre símbolos	Probabilidad de bit erróneo	Características
BPSK	2	180°	$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$	Mayor inmunidad al ruido. Velocidad de transmisión menor.
QPSK	4	90°	$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}} \right)$	Se duplica la velocidad de transmisión que BPSK.
16-QAM	16	Desfase en amplitud y fase	$P_b = \frac{4}{k} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3k E_b}{M-1 N_o}} \right)$	Mejor calidad en la transmisión. Inmunidad al ruido.

Se tiene a continuación los significados de algunas variables empleadas en la tabla 3:

E_b , es la energía por bit

N_o , es la densidad espectral de potencia de ruido

M , es el número de símbolos

k , es el número de bits

2.2.4. Modulación OFDM

La modulación por división ortogonal de frecuencia (en inglés, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (OFDM), se define como un método que modula un conjunto de portadoras de frecuencias diferentes en QAM o PSK para luego ser enviada. Antes de realizar la modulación OFDM se pasa la señal a través de un codificador de canal con el único objetivo de lograr corregir cualquier error que se produzca al momento de transmitir. (Vargas, Lopez, & Rocha, 2007).

En la figura 8 se representa tanto en tiempo como en espectro tres portadoras ortogonales.

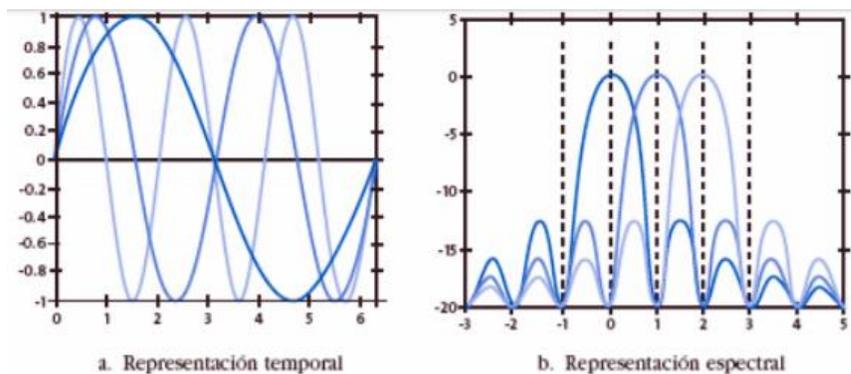


Figura 8. Señal OFDM
Fuente: (Vargas, Lopez, & Rocha, 2007)

La modulación OFDM cuenta con la ventaja de ortogonalidad, el cual tiene un mecanismo que puede reducir el problema de interferencia de multitrayecto. El método OFDM tiene una gran eficiencia de espectro y una mayor resistencia a las interfaces de radiofrecuencia. Un adelanto

importante en la utilización de OFDM fue la incorporación del prefijo cíclico (CP) para solucionar el conflicto de la ortogonalidad (Moreno, 2013), como se observa en la figura 9.

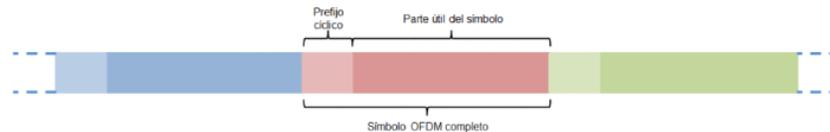


Figura 9. Símbolo OFDM con CP

Fuente: (Moreno, 2013)

Los datos son modulados sobre N portadoras utilizando la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT), obteniendo así valores complejos. La señal añade muestras a modo de preámbulo del prefijo cíclico y así logra originar el símbolo OFDM a transmitir. Mientras que en el receptor el prefijo cíclico es extraído y la señal que resulta es demodulada por la transformada rápida de Fourier (FFT) (Vargas, Lopez, & Rocha, 2007).

A continuación se presenta algunas propiedades de los sistemas OFDM.

- Logran eliminar el efecto de interferencia entre portadoras (ICI) o la interferencia entre símbolos (ISI) mediante la implementación del prefijo cíclico.
- Mediante la división del canal a sub canales usando banda estrecha, el sistema se vuelve más robusto.
- Se optimiza el uso del espectro.
- Se usa una codificación de canal para responder ante algunas pérdidas de datos en la transmisión.
- Es eficiente debido al uso de transformada inversa de Fourier.
- Las sub portadoras se deben codificarse con un código convolucional antes de poder realizar la IFFT.

Un argumento en contra de OFDM se debe a algunos errores que puede suceder al momento de la sincronización entre los cuales se tiene:

- **Sincronización de Símbolo:** Si se tiene un error de sincronización pequeño para lograr mantener la respuesta del canal, se tiene dos opciones para reducirlo, la primera está basada en el uso de subportadoras pilotos y la segunda en el prefijo cíclico.
- **Sincronización de Portadora:** Los errores se deben a la diferencia entre los osciladores del transmisor y receptor, dando lugar a la aparición de ICI en el sistema, este se produce por la pérdida de la ortogonalidad entre sub canales (Moreno, 2013).

2.3. TV White Space (TVWS)

El uso de TVWS está enfocado en los espacios en blanco que tienen los canales de transmisión, esto quiere decir que se usa las frecuencias libres que se hallan a disposición para su utilización sin necesidad de licencias en el espectro que no está siendo utilizadas eficazmente por los usuarios, dichas frecuencias no utilizadas se las conoce como espacios en blanco, el rango de frecuencias del espectro en donde funciona TVWS son las bandas de VHF entre 54 a 216 MHz y UHF entre 470 a 698 MHz. La tecnología TVWS busca el mejoramiento del acceso al internet en entornos difíciles, además el uso de frecuencias bajas (MHz) permite la creación de una red de largo alcance y dejando a un lado la implementación de enlaces punto a punto, lo que representaría una gran ventaja para mejorar las conexiones en zonas rurales (Artieda & Coronel, 2014) .

En la figura 10 se puede observar que ciertas bandas del espectro radioeléctrico no se encuentran ocupadas durante todo el tiempo.

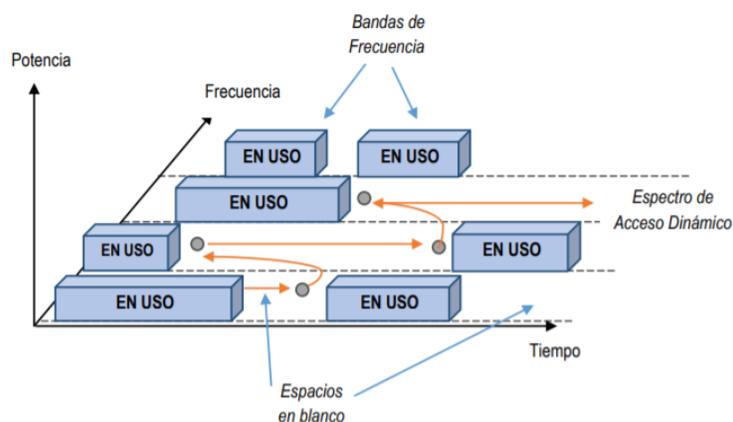


Figura 10. Espacios en blanco

Fuente: (Artieda & Coronel, 2014)

Anteriormente estos espacios tenían el propósito de evitar las interferencias entre canales de transmisión, pero se ha llegado a investigar que el espectro no usado podría usarse para proporcionar acceso a internet de banda ancha, y así funcionar junto con los canales que brindan cobertura a la televisión analógica. Una ventaja es que se puede proveer a zonas rurales de una red para el acceso a internet. (Castañeda & Guerrero, 2015).

Sin duda la reutilización de estos espacios en blanco es de gran importancia dado que poco a poco la televisión digital se expandirá completamente y se dejara de utilizar las frecuencias que usa la televisión analógica. Por lo que para lograr el uso del espectro se debe ir creando aplicaciones que ocupen las frecuencias bajas en MHz de la televisión analógica (Gómez, 2013).

La operación de los espacios en blanco de TV está permitida en canales de ancho de banda de 6 MHz en EE.UU dentro de las frecuencias de 54 a 698 MHz, en Europa se permite la operación de canales de 8 MHz dentro de las frecuencias de 470 a 790 MHz y en Ecuador según Arcotel se

permite la operación de canales de 6 MHz en las frecuencias de 54 a 698 MHz (Beltran, 2016) , como se observa en la figura 11.

Hoy en día el Ecuador se encuentra en un proceso de migración hacia la tecnología digital, el cual consiste de un periodo de tiempo en el que se transmiten señales analógicas y digitales de manera simultánea, este proceso se llevará a cabo hasta que se dé el apagón analógico en todo el territorio nacional (Artieda & Coronel, 2014).

Servicios Operando	Frecuencia Inicial – Frecuencia Final	Banda
RADIODIFUSIÓN		
EQA.15 (Emisiones de televisión)	54 MHz - 68 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
EQA.15 (Emisiones de televisión)	68 MHz – 72 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
EQA.20 (Emisiones de televisión)	76 MHz – 88 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
	88 MHz – 100 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
	100 MHz – 108 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
EQA.35 (Emisiones de televisión)	174 MHz – 216 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN		
EQA.65 (Emisiones de televisión)	512 MHz – 608 MHz	UHF
RADIODIFUSIÓN		
(Emisiones de Radiodifusión) EQA.70 5.311 ^a	614 MHz – 698 MHz	UHF

Figura 11. Bandas de operación de TVWS

Fuente: (Vásquez, 2018)

2.4. Radio Definido por Software

La radio definida por software SDR (en inglés, *Software Defined Radio*), consiste en el uso de equipos de radio en donde la parte de implementación en hardware es mínima, mientras que gran parte de las funciones se realizan mediante software a través de programas en un computador. Los equipos definidos por software tienen como objetivo implementar las funciones de un sistema de telecomunicaciones a nivel físico mediante la programación en software, teniendo varias opciones de programas que pueden utilizarse como son GNU radio, LabVIEW y Matlab. Se concluye que este tipo de equipos de radio definidos por software abre la posibilidad de que el procesamiento digital de señales permita prestaciones más sencillas, dado que antes su implementación era imposible con circuitos analógicos (Fernández, 2008)

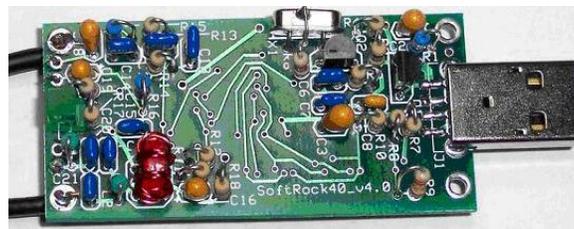


Figura 12. Ejemplo de un equipo SDR
Fuente: (Fernández, 2008)

2.4.1. USRP-2920

El periférico de radio por software universal USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*), visto en la figura 13, es un periférico desarrollado y distribuido por el fabricante *Ettus Research* y *National Instrument*, este equipo fue diseñado para trabajar junto con un agente de procesamiento externo como un computador o una estación de trabajo mediante el uso del dispositivo programable que es la matriz de puertas programables FPGA (en inglés, *Field-Programmable Gate Array*), para la realización de sistemas de radio software (Pinar, 2015).

Los equipos USRP fueron diseñados para ser accesibles y utilizar software de código abierto, logrando que los usuarios puedan implementar sistemas de radio mediante el uso de una red y sus computadores. Además, algunos equipos USRP cuentan con la funcionalidad de ser transceptores, diseñados principalmente para la investigación de los sistemas de telecomunicaciones, como en estándares 802.11.



Figura 13. USRP

Fuente: (National Instruments, 2017)

Un equipo USRP cuenta con dos niveles de tarjetas, en el primer nivel se encuentra la tarjeta principal que es la tarjeta madre en donde se ubican la FPGA, convertidores digital a análogo DAC (en inglés, *Digital-to-Analog Converter*) y convertidores análogo a digital ADC (en inglés, *Analog-to-Digital Converter*), el puerto Gigabit Ethernet y la alimentación del equipo, como se observa en la figura 14. En el segundo nivel se ubican las tarjetas secundarias conocidas como *Daughterboards*, las cuales sirven para la transmisión y recepción. Entonces, el USRP puede utilizar a la vez varias tarjetas secundarias, que pueden llegar a funcionar como transceptoras (T_x/R_x), esto quiere decir que pueden transmitir y recibir, pero una sola tarjeta a la vez (Pinar, 2015).

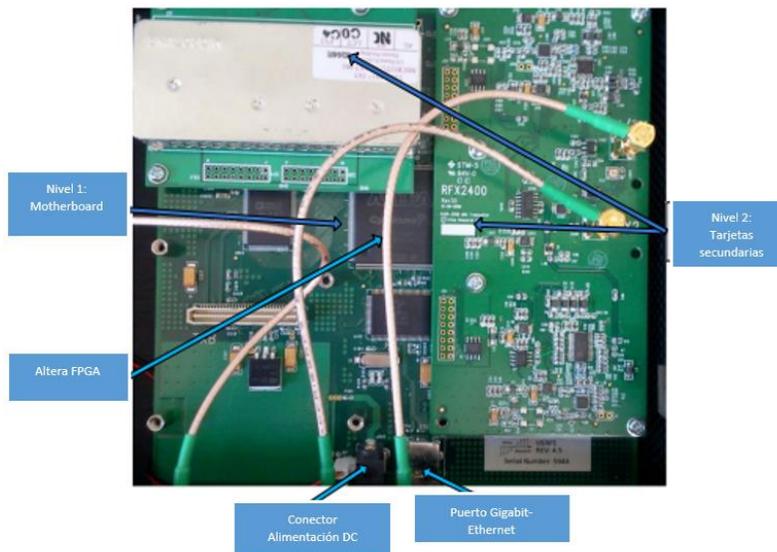


Figura 14. Niveles del USRP
Fuente: (Pinar, 2015)

A continuación se detalla cada una de las tarjetas que utiliza el USRP-2920 para entender las diferentes funciones físicas con las que cuenta.

2.4.1.1. Tarjeta Madre FPGA

La tarjeta madre en el equipo USRP es una tarjeta FPGA de la marca Altera, como se observa en la figura 15, en donde se conectan todos los periféricos, los puertos MIMO, la alimentación y el puerto Gigabit Ethernet. La conexión por el enlace Gigabit Ethernet cuenta con una tasa de 25 MS/s, donde MS/s son mega muestras por segundo, cuando trabaja con 16 bits de información y de 50 MS/s con 8 bits, se debe conocer que el equipo USRP-2920 solo se puede comunicar mediante el enlace Gigabit Ethernet (Bustillos, 2016).

En el convertor ADC se tiene una tasa de 100 MS/s y en el convertor DAC de 400 MS/s para el uso de la recepción y transmisión respectivamente. También cuenta con un convertidor digital Down (DDC) que tiene la función de adaptar la señal de banda base que se genera en el

ADC, este conversor usa tres filtros y dos canales, una para la componente en cuadratura (Q) y otra para la fase (I) de la señal en banda base, que cuentan con una tasa de muestreo de 7,68 MS/s. El convertidor digital Up (DUC) en cambio realiza el proceso contrario y cuenta con tres sub canales para la comunicación con ancho de banda de 61,44 MS/s, obteniendo una tasa de salida total de 368,44 MS/s por las dos salidas IQ (National Instrument, 2015).



Figura 15. Tarjeta madre del USRP
Fuente: (Pinar, 2015)

2.4.1.2. Tarjeta Hija SBX

El equipo USRP cuenta con la tarjeta SBX como se observa en la figura 16, que es un transceptor que trabaja en un rango de ancho de banda entre 400 MHz y 4,4 GHz, además logra obtener un ancho de banda de operación de 40 MHz cuando usa 8 bits de operación y de 20 MHz cuando utiliza 16 bits. Se usan amplificadores en la transmisión lo cual aumenta la potencia de la señal entre el rango de 0 a 31,5 dB y para la recepción se utiliza dos amplificadores, el primero aumenta la señal degradada por el canal y el segundo aumenta la ganancia de la señal entre 0 dB a 31,5 dB y dado que se usa esta tarjeta hija se obtiene dos funciones en la recepción (R_{X1} y R_{X2}) y una sola función para la transmisión (T_{X1}) (National Instrument, 2015).

Esta tarjeta está constituida por un filtro pasa bajos que tiene como función de admitir el paso de las señales de frecuencia intermedia , además cuenta con un oscilador local que se encarga de generar la señal sinusoidal, y por último cuenta con otro oscilador controlado por voltaje (VCO) (Arteaga A. , 2012).



Figura 16. Tarjeta secundaria del USRP
Fuente: (Pinar, 2015)

2.4.1.3 Arquitectura

En la figura 17 se observa un diagrama general en donde se describe la estructura de los sistemas transceptores SDR y la capa física, constituidos por el procesamiento RF, los convertidores de las señales analógicas a digitales.

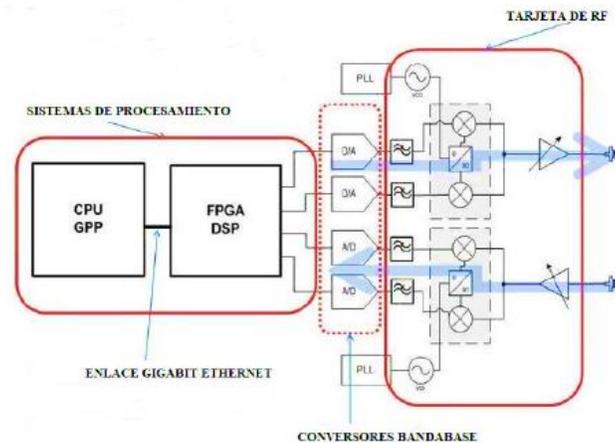


Figura 17. Arquitectura de SDR
Fuente: (Pinar, 2015)

El USRP-2920 se encuentra constituido por dos tarjetas, la tarjeta madre cuya función es la del procesamiento de banda base, mediante la FPGA que está compuesto por los convertidores análogo-digital y digital-análogo que tienen como función la adquisición de muestras y la comunicación con el computador del usuario o equipo embebido. La tarjeta hija se encarga principalmente del procesamiento de RF que constituye en el rango de la frecuencia de operación de bajada y subida.

2.4.1.4 Conectores y Panel Frontal del USRP

En el USRP-2920 tiene una estructura exterior que cuenta con varios puertos de conexión y LEDs indicadores del funcionamiento del equipo. Dentro de las conexiones principales se tiene los puertos (en inglés, *SubMiniature versión A*) SMA con 50Ω de impedancia, unos de estos conectores son para la transmisión y dos para la recepción. Además se tiene un conector para el cable de expansión MIMO el cual se usa para poder conectar dos equipos simultáneamente y a su

vez configurarlos mediante el enlace Gigabit Ethernet. Cuenta con una conexión para la alimentación del equipo de 6V a 3A. En la figura 18 se observa el panel frontal del USRP.

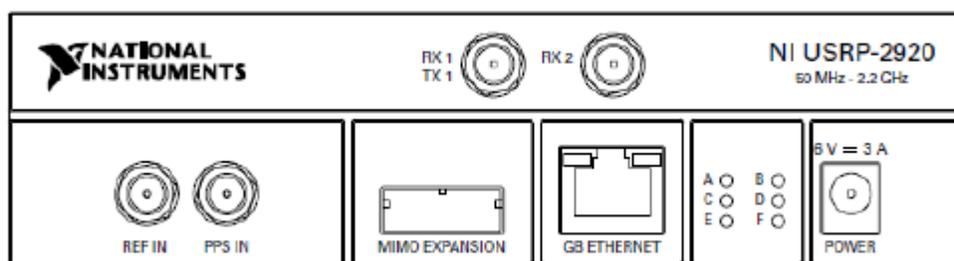


Figura 18. Panel frontal del USRP-2920

Fuente: (National Instrument, 2015)

Los conectores de referencia (REF) y pulsos por segundo (PPS) representan a las señales externas de entrada que pueden ser usadas, el conector REF se usa para el oscilador local con una impedancia de 50Ω y el conector PPS es utilizada para una señal de referencia de los pulsos por segundo o una señal de tiempo para referencia. Además el equipo cuenta con dos conectores que sirven para la colocación de las antenas de RF, una para la recepción de datos R_{X2} y la otra para recepción y transmisión R_{T1}/R_{X1} , debido a esta configuración se puede usar también el equipo como transceptor.

Como ya se mencionó anteriormente el equipo cuenta con una antena transceptora VERT400 como se observa en la figura 19, la cual funciona en tres bandas de frecuencia (144 MHz / 400 MHz / 1200 MHz), que tiene un valor de 10 W de potencia máxima.



Figura 19. Antena VERT400 de USRP-2920

Fuente: (National Instrument, 2015)

2.4.1.5. Conexión con el USRP-2920

Para conexión del equipo USRP-2920 con un computador o sistema embebido se realiza mediante el enlace Gigabit Ethernet (1000 Mbps), por lo tanto si el computador con el que se fuera a trabajar no cuenta con un enlace Gigabit Ethernet entonces se puede optar por otras opciones como la utilización de un adaptador Gigabit Ethernet a USB 3.0, este adaptador es de alta fidelidad pero genera un retardo debido a la conversión de paquetes. También se puede implementar el uso de un *switch* para entablar el enlace punto a punto y que logre encargarse de la negociación con los puertos del equipo USRP. En la figura 20 se tiene las diversas maneras de entablar la conexión con el USRP.

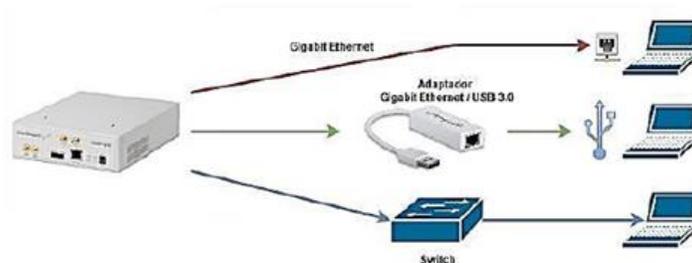


Figura 20. Tipos de conexión con el USRP-2920

Fuente: (Bustillos, 2016)

Después de realizar la conexión con el puerto Gigabit Ethernet, se debe configurar la conexión punto a punto, el USRP de la marca *National Instrument* viene en general por defecto una NIC (en inglés, *Network Interface Card*) con dirección IP (en inglés, *Internet Protocol*) 192.168.X.X/24 por lo que al configurar la interfaz del computador se debe colocar un IP dentro de la misma red. Por último se tiene que instalar el Driver del Hardware del USRP (UHD), para GNU Radio y Matlab se debe instalar desde servidores externos, mientras que para LabVIEW se tiene incorporado el controlador dentro de su paquete de comunicación NI-USRP.

2.4.2. Software

El equipo USRP-2920 es comercializado al usuario con el lenguaje de desarrollo para LabVIEW, pero se tiene la ventaja que este equipo cuenta con características similares a los equipos de la familia USRP-N210, por lo que se tiene la oportunidad de utilizar tres lenguajes de programación: LabVIEW, Matlab y GNU Radio.

2.4.2.1 GNU Radio

Es una herramienta que provee un lenguaje para el procesamiento de señales, además es de código abierto lo que facilita la implementación de sistemas SDR. Se tiene dos opciones para utilizar GNU Radio, la primera es utilizarlo junto con hardware para la ejecución de radios definidas por software, y la segunda es utilizarlo sin ningún hardware en un entorno de simulación. Se puede observar la interfaz de GNU Radio en la figura 21. Este software es usado frecuentemente por académicos o aficionados para ayudar a las investigaciones en las comunicaciones inalámbricas (Sanchez, 2015)

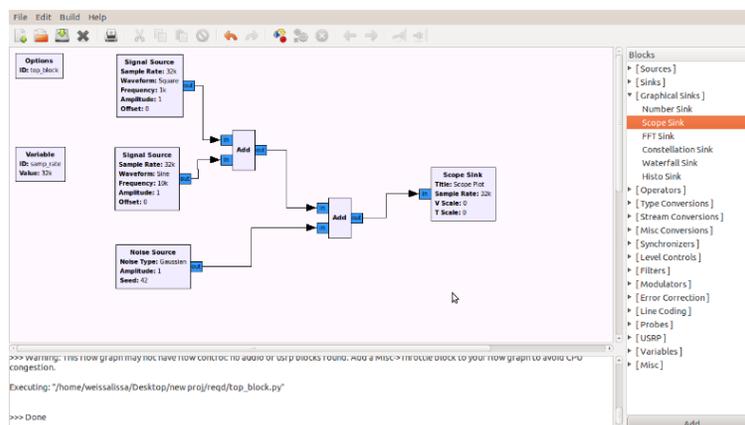


Figura 21. Interfaz de GNU Radio

Fuente: (Sanchez, 2015)

En GNU radio se construyen las aplicaciones mediante un entorno gráfico llamado GNU Radio Companion o mediante la implementación de Python, pero si se requiere de un rendimiento alto entonces se desarrolla en C++. El software puede desarrollar algoritmos de procesamiento de señal utilizando datos generados evitando así la necesidad de hardware real. El programa GNU Radio tiene un entorno gráfico que genera bloques para los procesamientos de las señales de radio definido por software junto con hardware de RF o a la vez sin hardware en un entorno netamente de simulación.

Se muestra el entorno de programación de GNU Radio en la figura 22:

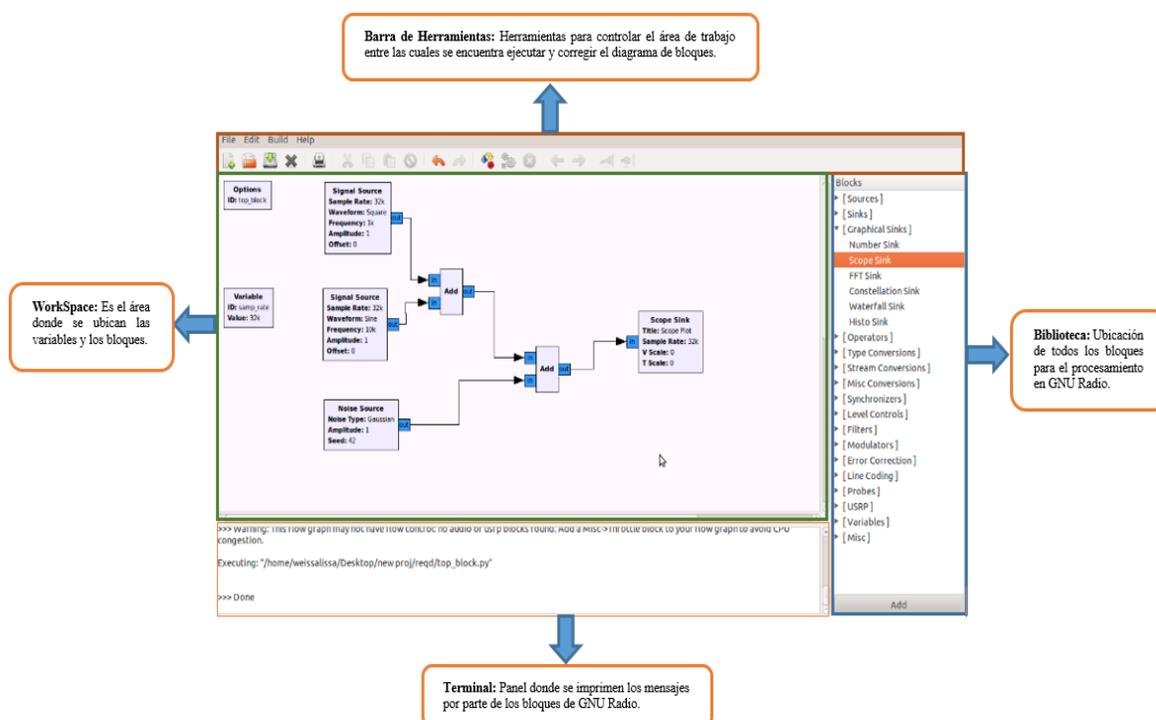


Figura 22. Entorno de GNU Radio Companion

- **Propiedades de los bloques en GNU Radio**

Cuando se construye un programa se utilizan los bloques de procesamiento en los cuales se deben introducir sus parámetros, entre los principales se tiene la definición del ID, este es muy importante ya que define el nombre del archivo que se genera, además que este va a determinar el nombre que tendrá el archivo de *Python*. También se puede modificar el tamaño de la ventana del área de trabajo en el parámetro *Windows Size*, como se observa en la figura 23, para tener mayor comodidad en el área de trabajo al momento de utilizar los bloques de procesamiento para el diseño del sistema.

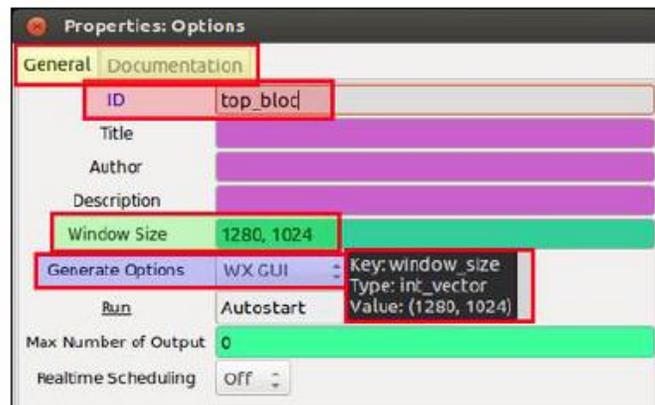


Figura 23. Propiedades de los bloques

Fuente: (Sanchez, 2015)

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AF

El presente capítulo describe los procesos utilizados para el diseño de un transmisor y receptor, implementando el estándar IEEE 802.11af, además de los bloques de procesamiento de señales que se utilizó para la implementación del sistema mediante la plataforma por software GNU Radio.

La figura 24 muestra el diagrama de bloques del diseño en general del sistema, el cual se basa en la utilización de un computador y la USRP.

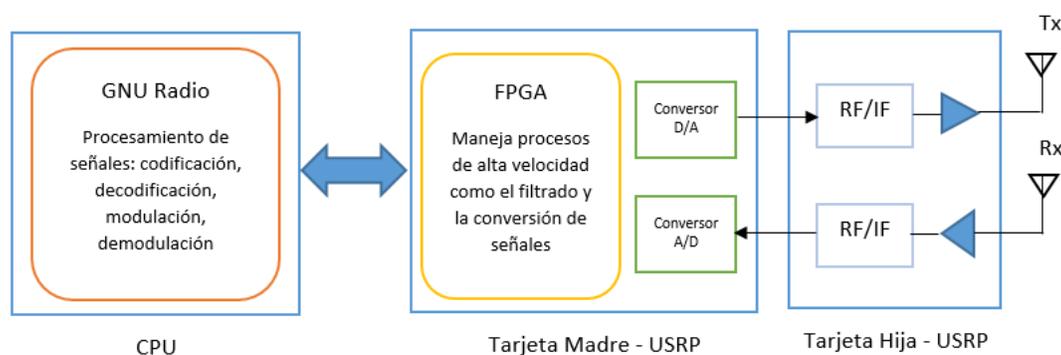


Figura 24. Diagrama de bloques del diseño en general

Para la implementación del estándar 802.11af se debe tener en cuenta algunos requisitos previos tanto en la parte de hardware como en software.

Hardware: Se necesita contar con un computador que tenga mínimo un procesador Intel Core i3 para soportar el procesamiento de datos, además debe tener una memoria RAM mínima de 4 Gb para una mayor velocidad de ejecución de programas. Por último el computador debe tener un puerto Giga-Ethernet para entablar la comunicación con el USRP. Se necesita equipos USRP

que trabajen con un rango de frecuencias inferiores a 1 GHz debido a que el estándar 802.11af a implementar utiliza frecuencias en TVWS.

Software: Se necesita que el sistema operativo en el computador sea Linux, para obtener un mejor rendimiento debido a que es el sistema operativo de origen del programa GNU Radio. Antes de instalar el programa GNU Radio el cual se utilizará para el procesamiento de señales, es necesario instalar el USRP Hard Drive (UHD) que se trata de librerías que permiten la conexión y el manejo de los recursos del USRP con GNU Radio. Finalmente se procede a instalar el programa GNU Radio.

Para la implementación del estándar 802.11af se utilizará canales con anchos de banda de 6 MHz según normativas dispuestas por la Arcotel en Ecuador para la operación de los espacios en blanco de TV en Ecuador en las frecuencias de 54 a 698 MHz.

		32 (578-584)
		33 (584-590)
		34 (590-596)
		35 (596-602)
		36 (602-608)
UHF 614-644	IV	38 (614-620)
		39 (620-626)
		40 (626-632)
		41 (632-638)

Figura 25. Frecuencias en el espectro radioeléctrico

Gran parte del espectro se encuentra asignado para otros servicios, pero existen espacios entre canales adyacentes como se mira en el rectángulo azul de la figura 25 en donde hay un canal con un ancho de banda de 6 MHz entre las frecuencias de 608 MHz y 614 MHz, siendo su frecuencia central 611 MHz, para la implementación se trabajará únicamente con esta frecuencia.

3.1 Arquitectura del Sistema

El escenario del sistema para el diseño de la red Wi-fi basado en el estándar 802.11af se encuentra constituido por dos equipos USRP-2920 y dos computadores, el primer computador se utilizará como transmisor y el segundo como receptor, el diagrama se observa en la figura 26.

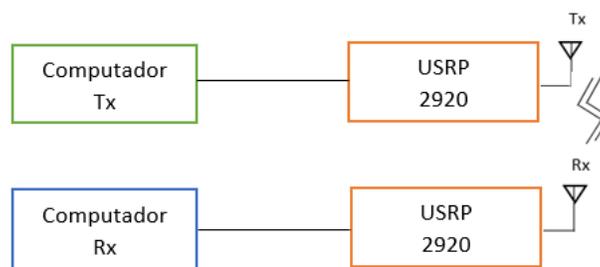


Figura 26. Escenario general del sistema

Como se mencionó en el apartado anterior se utilizará la frecuencia de 611 MHz con un ancho de banda de 6 MHz, debido a las normas impuestas por la Arcotel.

El escenario implementado para la red basada en el estándar 802.11af consta de dos equipos USRP-2920, el primer equipo USRP utilizado para el transmisor se conecta al computador Tx a través de un adaptador Realtek USB 3.0 a Gigabit Ethernet, se utilizó este método debido a que el computador usado no cuenta con un puerto Gigabit Ethernet para lograr la conexión del enlace. El segundo equipo USRP utilizado para el receptor se conecta al computador Rx a través de un enlace Gigabit Ethernet, dado que este computador si cuenta con un puerto Gigabit Ethernet.

Nota: El adaptador Realtek USB 3.0 a Gigabit Ethernet es compacto y permite actualizar el computador para lograr operar a una velocidad de 1000 Mbps, para usarlo se debe instalar los drivers del adaptador, este proceso es muy sencillo dado que basta con tan solo conectar el adaptador al puerto USB para que el software de instalación se ejecute en el computador.

En la figura 27 se observa la arquitectura del sistema implementado:



Figura 27. Arquitectura implementada del sistema

En la tabla 4 se describe las especificaciones técnicas de los computadores utilizados para la implementación del sistema.

Tabla 4

Especificaciones Técnicas de los computadores

CARACTERÍSTICAS	COMPUTADOR TX	COMPUTADOR RX
Modelo	Hp Pavilion Dv4-2025La	Toshiba Satellite P55-B
Sistema operativo	Ubuntu 16.04 LTS de 64 bits	Ubuntu 16.04 LTS de 64 bits
Procesador	Intel Core i3 @ 2.4 GHz	Intel Core i7 @ 2.5 Ghz
Memoria RAM	4 Gb	12 Gb

El programa de GNU Radio puede ser instalado tanto en Windows, MAC OS y Linux, pero es recomendable instalarlo en el sistema Linux para un mejor rendimiento dado que es el sistema

de origen de GNU Radio. Por ese motivo se decidió utilizar el sistema operativo de Ubuntu 16.04 LTS, la instalación de GNU Radio se realiza mediante el uso de la terminal de Ubuntu, para esto se deja el link (Instalación-GNURadio) donde se tiene una guía de instalación. Una vez terminada la instalación se debe escribir en el terminal de Ubuntu el comando *gnuradio-companion* para abrir el programa.

Algunos errores que se presentan al momento de usar GNU Radio se debe ya sea por la programación o errores en la interfaz de usuario, esto debido a una mala conexión entre los bloques que utilizan diferentes tipos o longitudes de datos, cuando se presentan este tipo de errores es imposible la compilación del archivo, como se observa en la figura 28:

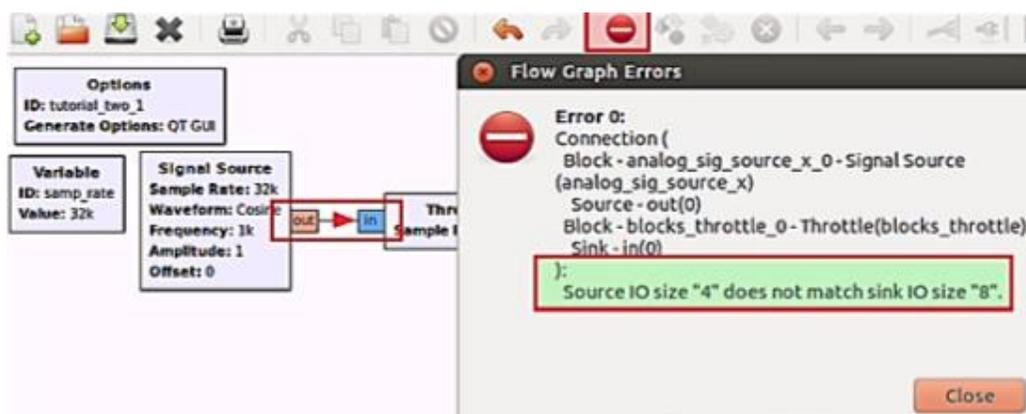


Figura 28. Error de conexión GNU Radio Companion

3.2 Diseño e Implementación del Transmisor

Para el diseño del transmisor se utilizó varios bloques para el procesamiento de los datos, en la figura 29 se observa la arquitectura en bloques del transmisor.

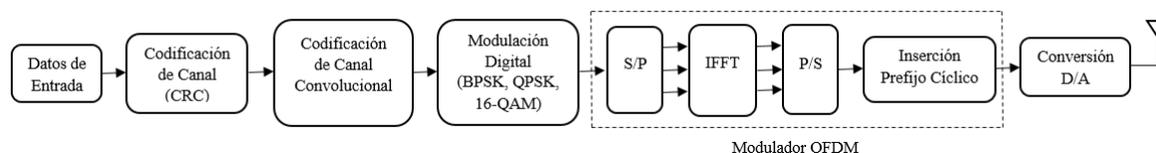


Figura 29. Diseño del transmisor

Una de las características en el estándar 802.11af es la utilización de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), por lo cual se implementó un modulador OFDM en el transmisor que se conforma de varios bloques.

A continuación, se detalla la función que cumple cada etapa del diagrama que se encuentran conformando el diseño del transmisor.

3.2.1 Datos de Entrada

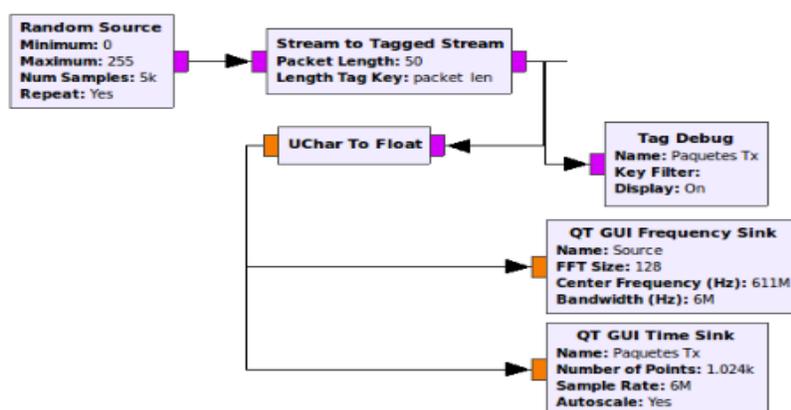
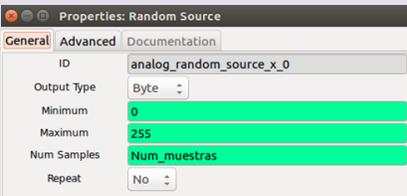
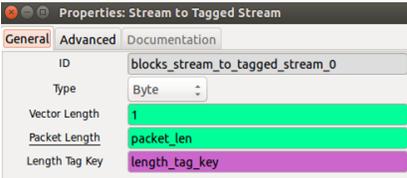
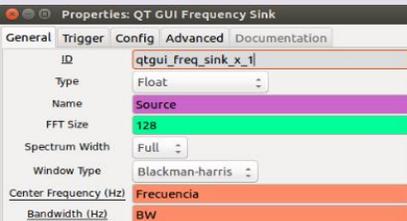
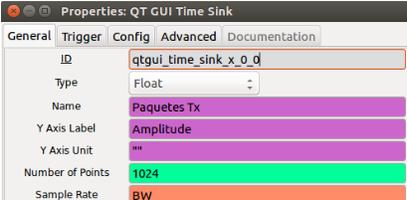


Figura 30. Bloques de los datos de entrada en GNU Radio

En la tabla 5 se describen las propiedades de cada bloque.

Tabla 5
Propiedades de los bloques de datos de entrada

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Random Source</i> es el encargado de generar números aleatorios de muestras dado en un rango determinado por el usuario, se escogió un rango de prueba de 0 a 255, dentro de las propiedades del bloque hemos determinado una cantidad de 5000 muestras para generarse en <i>Num. Samples</i>, dado que el parámetro del tipo de dato está en byte porque no hay la opción de bit, cada muestra estará comprendido por 8 bits. El parámetro <i>repeat</i> del bloque permite elegir si se repite la secuencia generada o no.</p>
	<p>El bloque <i>Stream to Tagged Stream</i> convierte una secuencia regular en una secuencia etiquetada. Por lo que agrega etiquetas de longitud en intervalos regulares. En el parámetro <i>Packet Length</i> se implementa una longitud de prueba de 50 bytes, cuyo valor se encuentra definido en la variable <i>packet_len</i> que representa el número de elementos por paquete de flujo etiquetado, cuya variable está definida en la parte superior de la figura 41.</p>
	<p>El bloque <i>QT GUI Frequency Sink</i> se encarga de mostrar una gráfica en el dominio de la frecuencia de los paquetes de entrada generados, que se ubican en la frecuencia de 611 MHz con un ancho de banda BW de 6 MHz, datos que en el apartado 3 se explica su utilización. Las variables Frecuencia y BW se definen en la parte superior de la figura 41. El tamaño de la FFT es de 128, característica del estándar 802.11af mostrado en la tabla 1.</p>
	<p>El bloque <i>QT GUI Time Sink</i> se encarga de mostrar una gráfica en el dominio del tiempo de los paquetes de entrada generados y etiquetados, con una tasa de muestreo igual al ancho de banda de 6 MHz</p>

En la figura 31 se observa una gráfica en el dominio del tiempo de los paquetes que se generaron y fueron etiquetados con una valor de longitud de prueba de 50 bytes.

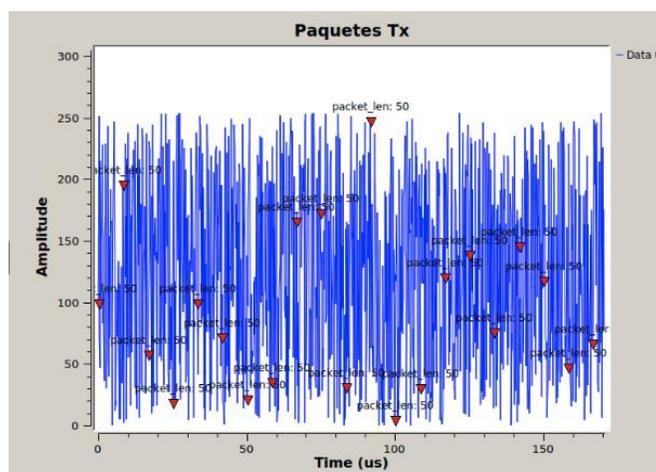


Figura 31. Gráfica de los paquetes transmitidos

Se observa en la figura 32, la señal en frecuencia de los paquetes de entrada generados que se ubican en la frecuencia central de 611 MHz con un ancho de banda de 6 MHz, la cual tiene una ganancia relativa de 33,20 dB, valores de la frecuencia y ancho de banda se explican su utilización en el apartado 3.

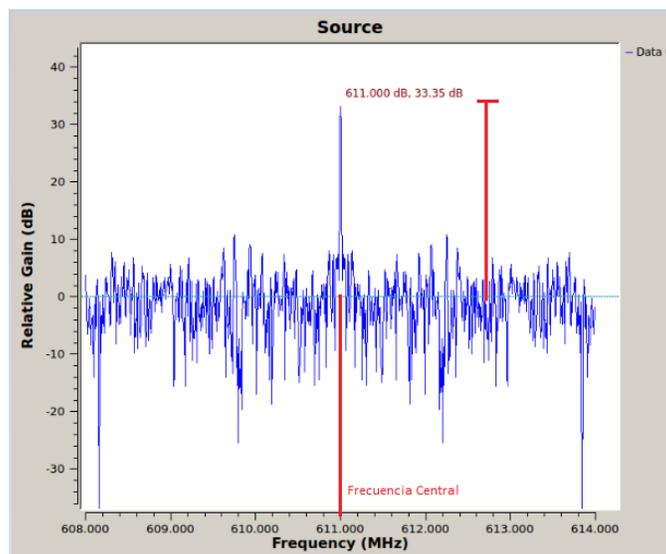


Figura 32. Gráfica en frecuencia de la fuente

3.2.2 Codificación de Canal

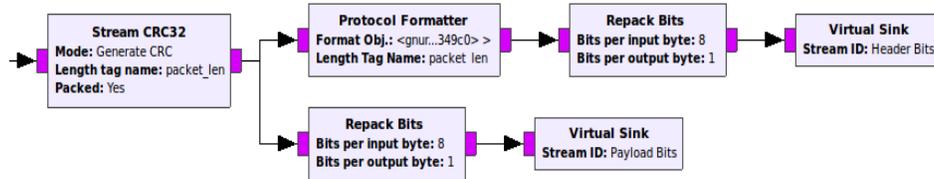


Figura 33. Bloques de la etapa de codificación de canal

La codificación de canal consiste en agregar redundancia, de manera que se pueda rehacer la secuencia original de datos ingresada en la entrada, de la forma más íntegra.

En un canal la información transmitida puede verse afectada por desvanecimientos logrando un nivel bajo de la relación señal a ruido (S/N) evitando que se pueda recuperar la información sin errores.

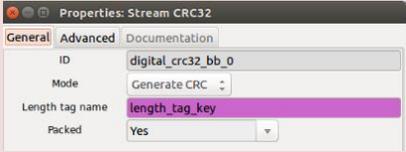
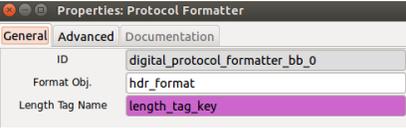
En la codificación de canal el principal objetivo es disminuir la probabilidad de error, a través de la detección y corrección de errores generados en un canal de comunicación, como resultado del ruido y el medio de propagación.

El código convolucional es un código para la detección de errores en donde cada uno de los símbolos de m bits de información se convierte al ser codificado en otro símbolo de n bits, por lo cual se puede determinar que m/n es la tasa del código, el estándar 802.11af trabaja con una tasa de código de $\frac{1}{2}$ como se observa en la tabla 1.

En la tabla 6 se describen las propiedades de cada bloque.

Tabla 6

Propiedades de los bloques de codificación de canal

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Stream CRC32</i> tiene como entrada un flujo de bytes que forman un paquete que viene del bloque <i>Stream to Tagged Stream</i>. El primer byte del paquete tiene una etiqueta con la clave de longitud y el valor es el número de bytes en el paquete que es de 50 bytes. La salida del bloque son los mismo bytes entrantes, pero detrás de un código de redundancia cíclica que tiene un valor de 32 bits cuyo valor viene por defecto por ser un CRC32, la etiqueta se restablece a la nueva longitud.</p>
	<p>El bloque <i>Protocol Formatter</i> utiliza un objeto de formato de encabezado para poder crear un encabezado a partir de un paquete de flujo etiquetado, este encabezado es transmitido desde este bloque, la carga útil debe enviarse como una secuencia etiquetada en paralelo para ser multiplexada más adelante. Para lo cual se utiliza la variable <i>hdr_format</i> implementada en este bloque, que además realiza una codificación por código convolucional con tasa de 1/2.</p>

3.2.3 Modulación Digital

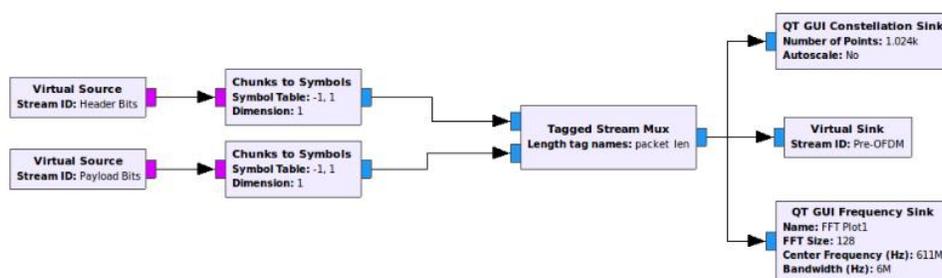
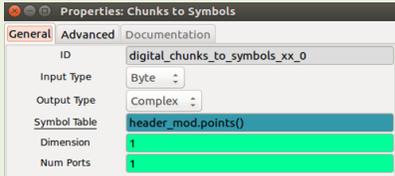
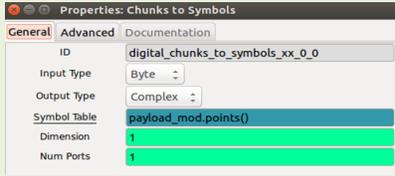
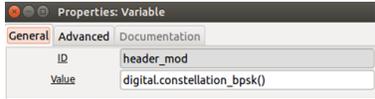
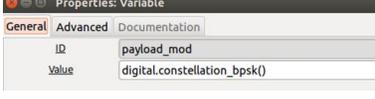


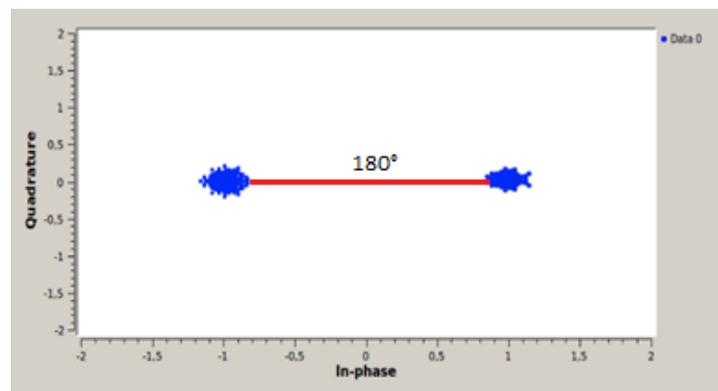
Figura 34. Bloques de la etapa de modulación digital

En la tabla 7 se describen las propiedades de cada bloque.

Tabla 7*Propiedades de los bloques de modulación digital*

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Chunks to Symbols</i>, asigna una secuencia de índices de símbolos desempquetados a una secuencia de puntos flotantes o de constelaciones complejas en dimensiones D, donde D es igual a 1 por defecto. Además se utiliza para realizar la modulación digital tanto BPSK, QPSK y 16-QAM mediante los parámetros <code>header_mod</code> y <code>payload_mod</code></p>
	
 	<p>Los parámetros <code>header_mod</code> y <code>payload_mod</code> son variables que se encuentran especificadas por los objetos <code>digital.constellation_bpsk()</code>, los cuales sirven para las modulaciones digitales, para cambiar de modulación basta con solo modificar el objeto poniendo el tipo de modulación que se desea en vez de <code>bpsk</code>, por ejemplo si se quiere una modulación QPSK se debe modificar el objeto a <code>digital.constellation_qpsk()</code>.</p>

La figura 35 representa el diagrama de constelación de una modulación BPSK, por lo cual cuenta con dos símbolos desfasados 180° , graficado a través del bloque *QT GUI Constellation Sink*.

**Figura 35.** Gráfica del diagrama de constelación BPSK

La figura 36 representa la señal resultante en el dominio de la frecuencia después de pasar por la multiplexación de las señales moduladas *Headers Bits* y *Payload Bits*.

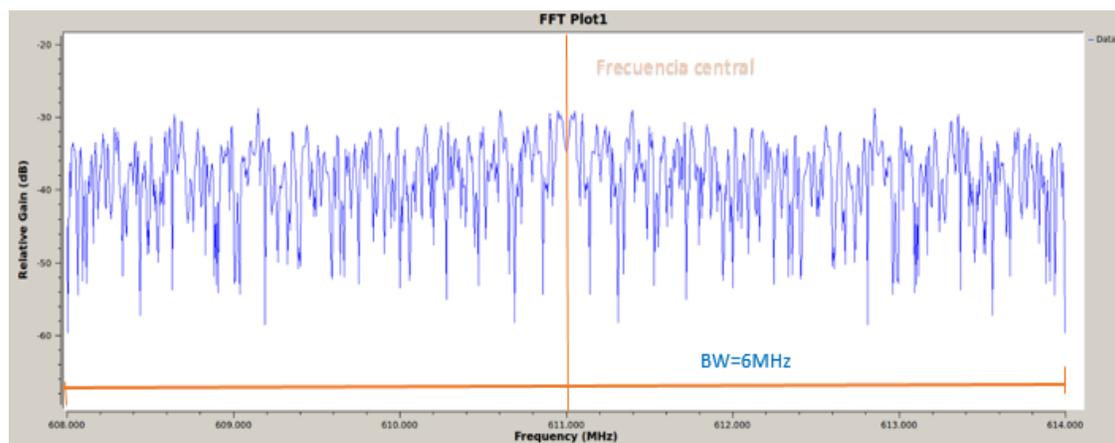


Figura 36. Gráfica del bloque Tagged Stream Mux en el dominio de frecuencia

3.2.4 Modulación OFDM

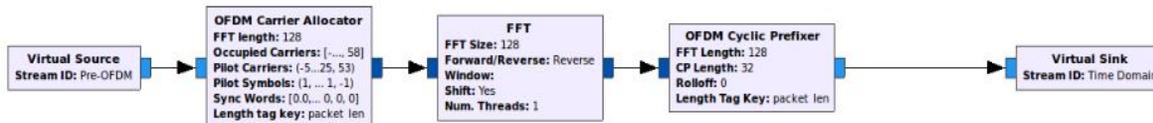
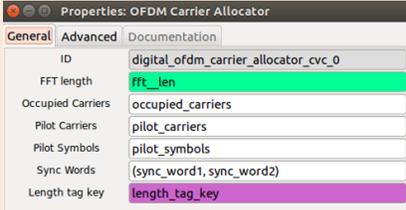
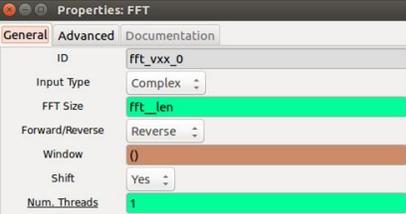
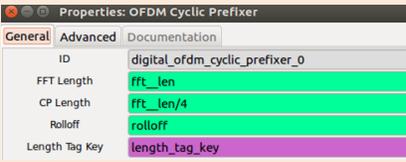


Figura 37. Bloques de la etapa de modulación OFDM

Para realizar la modulación OFDM se tiene un procedimiento de varios bloques que se describen en la tabla 8.

Tabla 8**Propiedades de los bloques de la modulación OFDM**

Bloques	Propiedades
	<p>Primero se implementa el bloque <i>OFDM Carrier Allocator</i>, el cual crea los símbolos OFDM de dominio de la frecuencia a partir de valores complejos, en el cual se agregan las portadoras piloto, para el estándar 802.11af observado en la tabla 1 se tiene como portadoras piloto los valores (± 11, ± 25 y ± 53); además se tiene las portadoras útiles que son desde (-58 a -2 y de 2 a 58).</p> <p>Este bloque convierte una secuencia de símbolos escalares complejos en vectores que son la entrada para una IFFT en un transmisor OFDM. Las etiquetas se propagan de manera que una etiqueta en un símbolo complejo entrante se mapea al símbolo OFDM correspondiente. Entonces, este bloque tiene como entrada una secuencia etiquetada de escalares complejos y como salida una secuencia etiquetada de vectores complejos de longitud <code>fft_len</code>, cuyo valor es 128 que se utiliza de longitud para la FFT dado que debe ser mayor al número total de portadoras que es 114 para el estándar 802.11af, valores especificados en la tabla 1.</p>
	<p>En segundo lugar se utiliza el bloque <i>FFT</i>, pero en sentido inverso, por lo tanto técnicamente se realiza una IFFT que convierte las secuencias del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, además se utiliza una longitud de FFT de 128 especificado en la tabla 1, para operar en modo IFFT se debe escoger la opción <i>Reverse</i> en las propiedades del bloque.</p>
	<p>Por último, se usa el bloque <i>OFDM Cyclic Prefixer</i>, el cual agrega un prefijo cíclico y realiza la conformación de impulsos en símbolos OFDM, en la entrada se tiene los símbolos OFDM en el dominio del tiempo, es decir después de haber pasado por una IFFT, cuya longitud de prefijo es la longitud de la <code>fft_len/4</code> lo que equivale a $128/4=32$. A la salida se tiene una secuencia de símbolos complejos escalares que incluyen el prefijo cíclico y la configuración del impulso.</p>

3.2.5 Salida del Transmisor

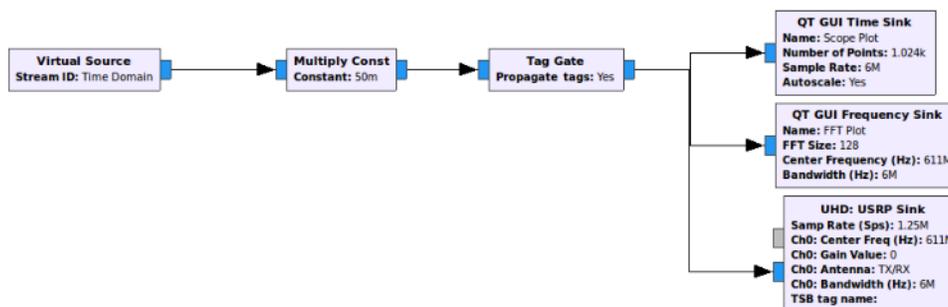


Figura 38. Bloques de la etapa de salida del transmisor

En la tabla 9 se describe el bloque a la salida del transmisor.

Tabla 9

Propiedades del bloque a la salida del transmisor

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>UHD: USRP Sink</i>, es el encargado de realizar la comunicación con el equipo USRP-2920 el cual recibe los datos a transmitir, para lo cual se debe llenar los siguientes parámetros: el <i>Samp Rate</i> (Sps) que es la velocidad de transmisión cuyo valor es de 1,25 MSps, definida por la variable <i>Vtx</i> que se encuentra en la parte superior de la figura 41, valor que se obtuvo bajo pruebas para obtener la velocidad de transmisión máxima como se observa en el apartado 4.2, la frecuencia central que se utiliza es una frecuencia libre de TVWS de valor 611 MHz dada por la variable Frecuencia definida en la figura 41.</p> <p>El ancho de banda BW que se utiliza es de 6 MHz especificado anteriormente por la Arcotel, además se debe escoger la antena TX/RX la cual se usa para la transmisión.</p>

La figura 39 representa la señal resultante en el dominio del tiempo en el bloque *QT GUI Time Sink* a la salida del transmisor para él envió de los datos, la señal en azul representa los valores reales y la señal en rojo representa los valores imaginarios.

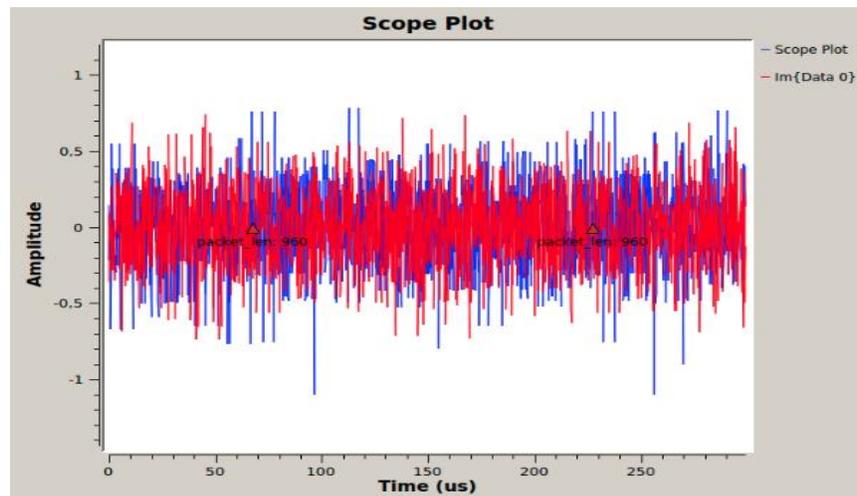


Figura 39. Gráfica de la señal de salida en el dominio del tiempo

La figura 40 representa la señal en el dominio de la frecuencia en el bloque *QT GUI Frequency Sink* a la salida del transmisor para el envío de los datos.

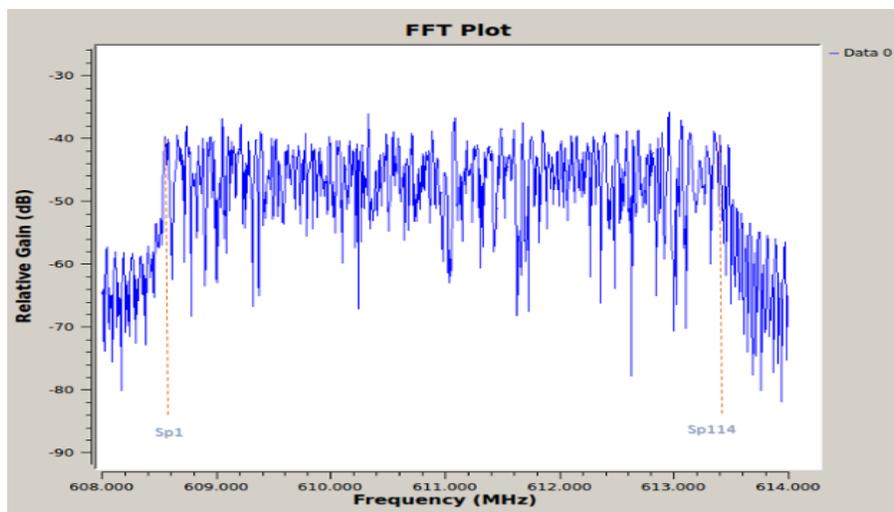
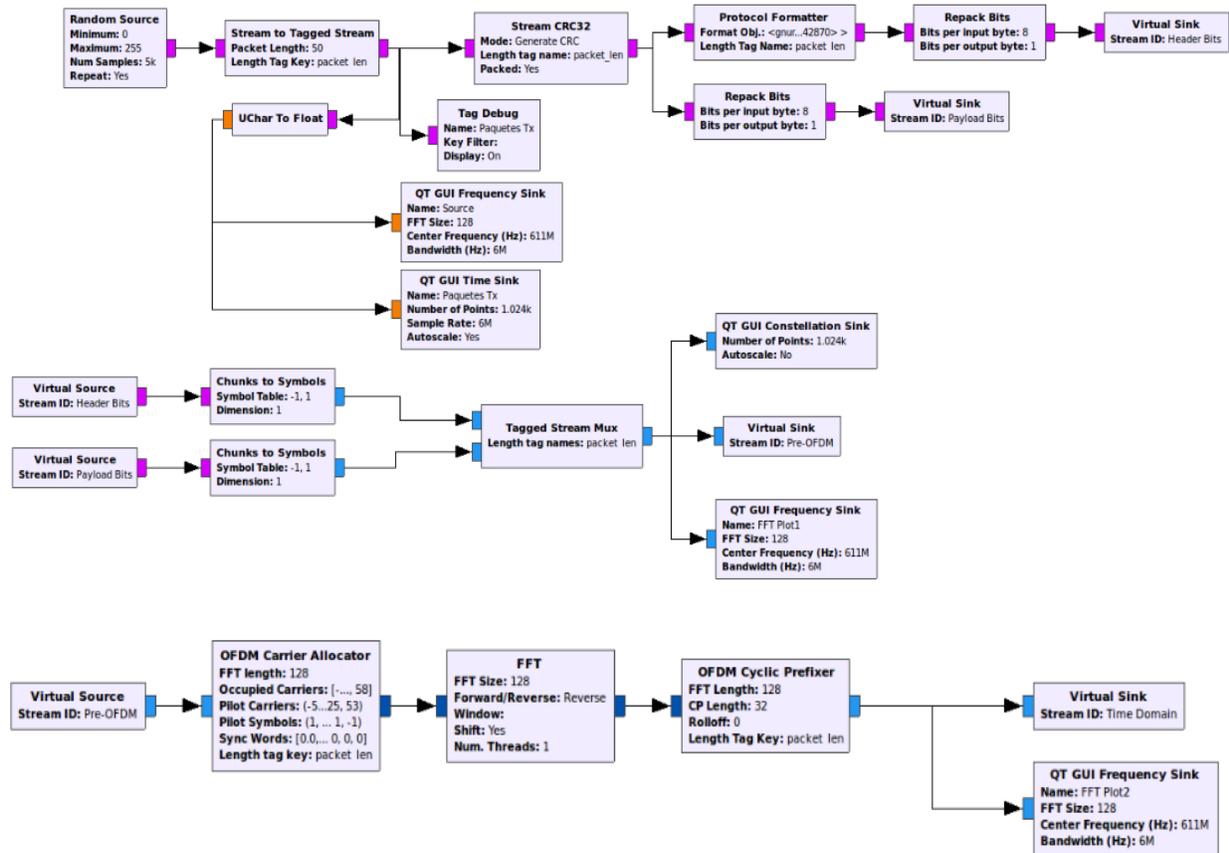
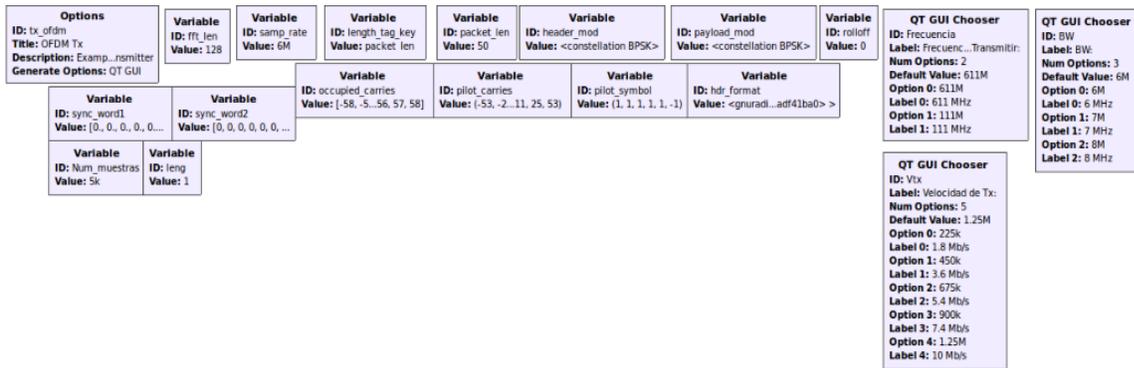


Figura 40. Gráfica de la señal de salida en el dominio de la frecuencia

En la figura 41 se observa el diagrama del transmisor realizado en GNU Radio Companion a través de los bloques de procesamiento de señales configurados anteriormente.



CONTINÚA

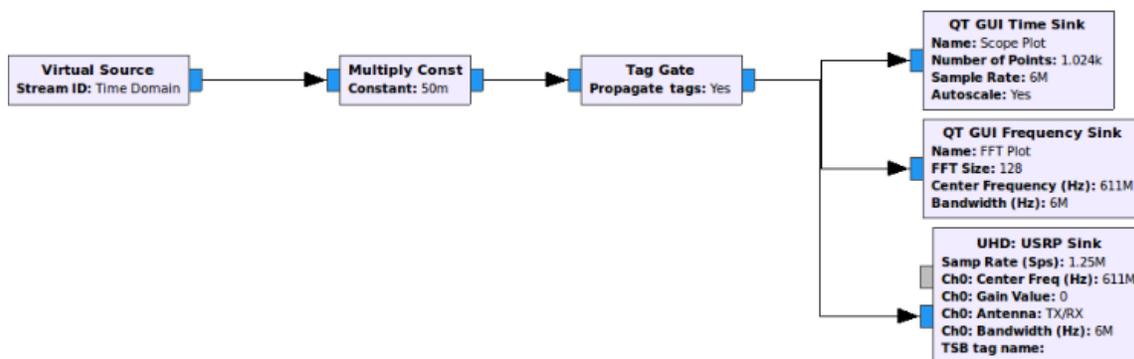


Figura 41. Diagrama completo del transmisor en GNU Radio

3.3 Diseño e Implementación del Receptor

Para el diseño del receptor se utilizó varios bloques para el correcto procesamiento de los datos, en la figura 42 se observa la arquitectura en bloques del receptor.

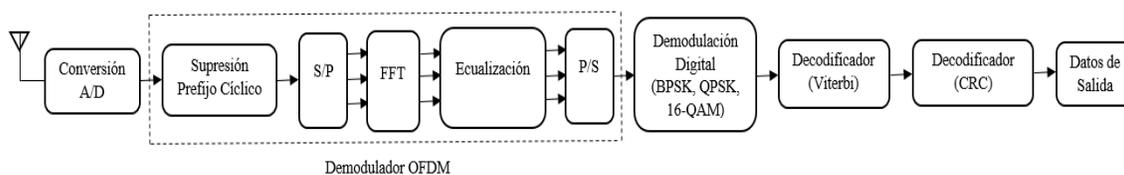


Figura 42. Diseño del receptor

A continuación, se describe la función que cumple cada etapa del diagrama que se encuentran conformando el diseño del receptor.

3.3.1 Entrada del Receptor

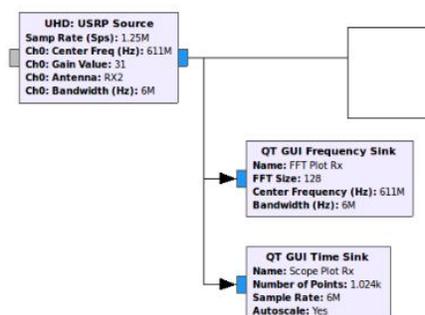


Figura 43. Bloques de la etapa de la entrada del receptor

En la tabla 10 se describe el bloque a la entrada del receptor.

Tabla 10

Propiedades del bloque a la entrada del receptor

Bloques	Propiedades
<p>La imagen muestra la interfaz de configuración de un bloque 'UHD: USRP Source'. Se ven pestañas para 'General', 'RF Options', 'FE Corrections', 'Advanced' y 'Documentation'. En la pestaña 'General', se muestran campos como 'ID' (uhd_usrp_source_0), 'Output Type' (Complex float32), 'Wire Format' (Automatic), 'Stream args', 'Stream channels' (1), 'Device Address', 'Device Arguments', 'Sync' (don't sync), 'Clock Rate (Hz)' (Default), 'Num Mboards' (1), 'Mb0: Clock Source' (Default), 'Mb0: Time Source' (Default), 'Mb0: Subdev Spec', 'Num Channels' (1) y 'Samp Rate (Sps)' (Vrx).</p>	<p>El bloque <i>UHD: USRP Source</i>, es el encargado de realizar la comunicación con el equipo USRP-2920 el cual recibe los datos provenientes del transmisor, para lo cual se debe llenar los parámetros del mismo valor que en el <i>UHD: USRP Sink</i> para que exista la conexión entre ambos equipos USRP: el <i>Samp Rate</i> (Sps) que es la velocidad de recepción cuyo valor es de 1,25 MSps explicado en el apartado 4.2 cuya variable es <i>Vrx</i> que se encuentra definida en la parte superior de la figura 55 , la frecuencia central que se utiliza es de valor 611 MHz que se define en la variable Frecuencia ubicada en la parte superior de la figura 55, el ancho de banda BW es de 6 MHz definido por la Arcotel y debe ser igual al que se usó en el transmisor, además se debe escoger la antena RX2 que se utiliza como antena receptora.</p>
<p>La imagen muestra la pestaña 'Advanced' de las propiedades del bloque. Se muestran los siguientes campos: 'Ch0: Center Freq (Hz)' (Frecuencia), 'Ch0: Gain Value' (31), 'Ch0: Gain Type' (Absolute (dB)), 'Ch0: Antenna' (RX2) y 'Ch0: Bandwidth (Hz)' (BW).</p>	

La figura 44 representa la señal a través del dominio de la frecuencia a la entrada del receptor obtenida en el bloque *QT GUI Frequency Sink*, se puede notar que la señal en la salida del transmisor y la señal a la entrada del receptor son parecidas por lo tanto se puede decir que los datos llegan sin interferencias.

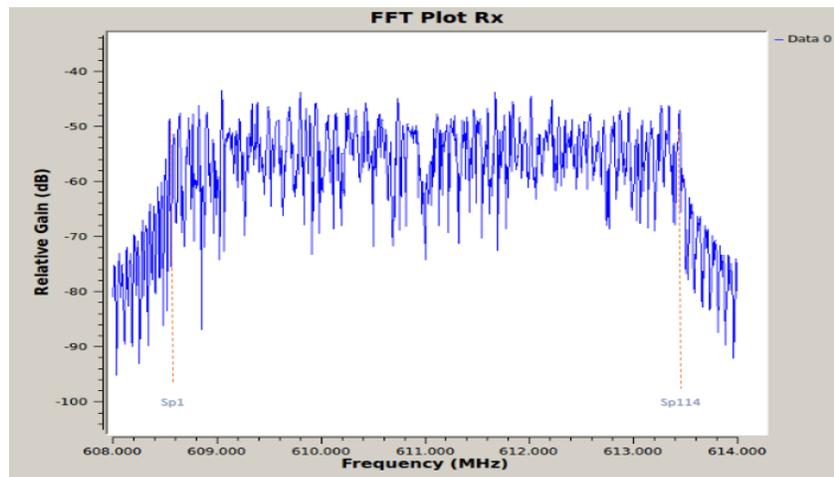


Figura 44. Gráfica a la entrada del receptor

La figura 45 representa la señal resultante en el dominio del tiempo a la entrada del receptor, obtenida en el bloque *QT GUI Time Sink*, la señal en rojo son los valores imaginarios y la señal en azul son los valores reales, como se puede apreciar es muy similar a la gráfica de salida del transmisor en el dominio del tiempo, por lo cual no se aprecian pérdida de datos.

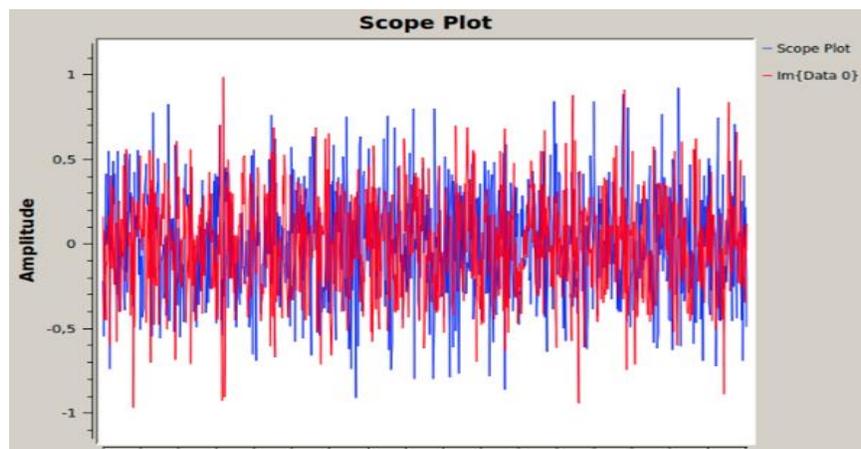


Figura 45. Gráfica a la entrada del receptor en dominio del tiempo

3.3.2 Demodulación OFDM

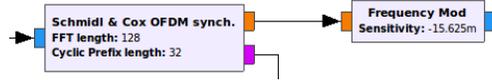


Figura 46. Primera etapa de la demodulación OFDM

En la tabla 11 se describe el bloque a la entrada de la demodulación OFDM

Tabla 11

Propiedades del bloque Schmidl & Cox OFDM synch.

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Schmidl & Cox OFDM synch.</i>, tiene en su entrada las muestras complejas, y cuenta con dos salidas, la salida 0 muestra el desplazamiento de frecuencia, escalado por la duración del símbolo OFDM, y la salida 1 del bloque comienza con el primer símbolo OFDM, el comienzo está marcado con un 1. La evaluación del desplazamiento de frecuencia se realiza en este bloque, pero no las medidas del ecualizador. Otro parámetro más que se debe ingresar en este bloque es la longitud del prefijo cíclico que viene dado por la $fft_len/4$ lo cual es equivalente a $128/4=32$.</p>

Además se cuenta con el bloque *Frequency Modulator*, el cual es un bloque modulador de frecuencia, toma una señal de banda base $x[n]$ y emite una señal de frecuencia modulada $y[n]$.

En este bloque el argumento de entrada no es la desviación de frecuencia, sino la sensibilidad específica, cuanto cambia la fase en función de la muestra de entrada.

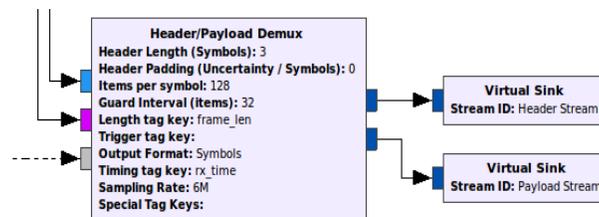
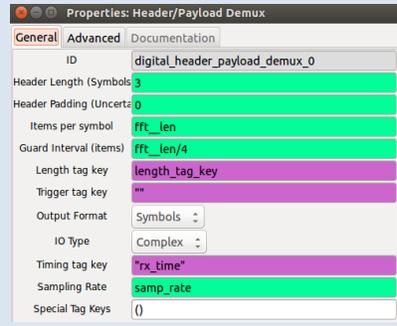


Figura 47. Bloque Header/Payload Demux

En la tabla 12 se describe el bloque Header/Payload Demux.

Tabla 12

Propiedades del bloque Header/Payload Demux

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Header/Payload Demux</i>, demultiplexa los paquetes de una transmisión con ráfagas, la aplicación en este bloque es el caso cuando está recibiendo paquetes con una longitud que no se ha determinado, por lo cual este bloque pasara la sección del encabezado a otros bloques para la demodulación. Usando la información del encabezado demodulado, se emitirá la carga útil. Para lo cual se utiliza la longitud de la FFT cuyo valor es 128.</p>

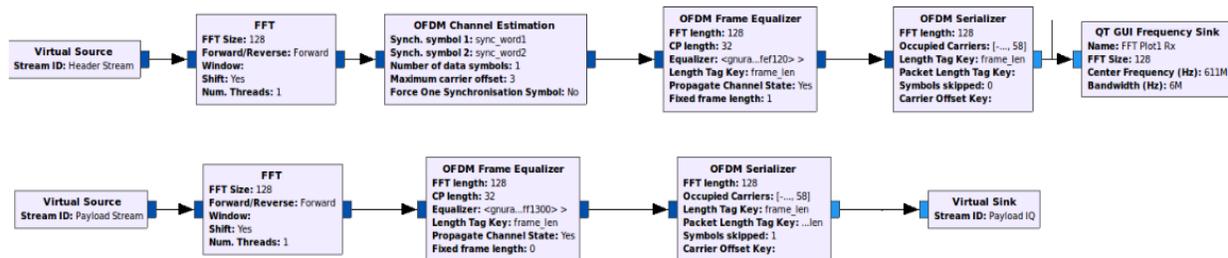


Figura 48. Bloques de la etapa de Demodulación OFDM

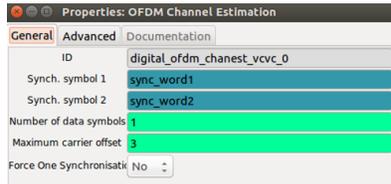
En la tabla 13 se describe los bloques en la demodulación OFDM.

Tabla 13

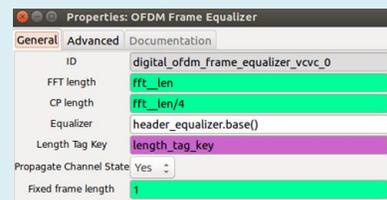
Propiedades de los bloques de Demodulación OFDM

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>FFT</i>, se encarga de realizar la transformada de Fourier con el objetivo de pasar las señales del dominio del tiempo a dominio de la frecuencia, mediante el uso de la variable <i>fft_len</i> que es el tamaño de la FFT cuyo valor es 128 especificado en la tabla 1, en este bloque se debe fijar la opción <i>Forward</i> para realizar la transformada rápida de Fourier.</p>

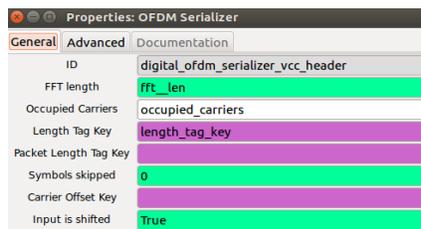
CONTINUÍA 



El bloque *OFDM Channel Estimation*, estima el desplazamiento del canal y la frecuencia OFDM de los preámbulos. A la entrada de este bloque se tiene los símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia, y se espera que uno o dos símbolos sean símbolos de sincronización, que se usan para estimar el desplazamiento de frecuencia. En cambio a la salida se obtiene los símbolos de datos sin los símbolos de sincronización, se tienen como parámetros el número de símbolos de datos, el cual es la cantidad de símbolos de datos que siguen a cada conjunto de símbolos de sincronización, este valor debe ser de al menos 1 por defecto. El segundo parámetro es el desplazamiento de portadora máximo, el cual es el número de portadoras que el desplazamiento de frecuencia puede hacer como máximo, en el bloque se ha escogido el valor de 3, ya que si se deja el valor de 0 se probaría todas las posibilidades haciendo que el tiempo de procesamiento sea más largo.



El bloque *OFDM Frame Equalizer*, va a realizar la ecualización en un marco de OFDM etiquetado, este bloque ejecuta dos procesos, en primer lugar elimina la compensación de portadora, si se encuentra una etiqueta en el primer elemento con la clave *ofdm_sync_carr_offset*, esta se interpreta como el desplazamiento de frecuencia. En segundo lugar realiza la ecualización en un marco OFDM etiquetado, la ecualización real se realiza mediante un objeto *ofdm_frame_equalizer* fuera del bloque. En resumen a la entrada se tiene una serie etiquetada de símbolos OFDM, y la salida se tiene lo mismo que en la entrada pero ecualizada y corregida en frecuencia. En los parámetros del bloque se tiene el objeto ecualizador *header_equalizer.base()*, el cual hará la ecualización real. Se utiliza la longitud de la FFT de 128 y el prefijo cíclico cuyo valor es *fft_len/4* que da 32.



El bloque *OFDM Serializer*, se encarga de serializar los símbolos de modulaciones complejas de subportadoras OFDM, por decir, este es el bloque inverso del *carrier_allocator*. Muestra los símbolos de los datos complejos como una secuencia etiquetada descartando los símbolos pilotos, para lo cual hace uso de las portadoras definidas en el estándar 802.11af cuyo rango de valores son de (-58 a -2 y de 2 a 58) con índice 0 en DC. El parámetro *Length Tag Key* es la clave de la etiqueta que identifica la longitud del marco de entrada en los símbolos OFDM.

La figura 49 representa la señal en el dominio de la frecuencia a la salida del proceso de demodulación en el bloque *QT GUI Frequency Sink*, después de eliminar las portadoras, cuya frecuencia central es la de 611 MHz con ancho de banda de 6 MHz.

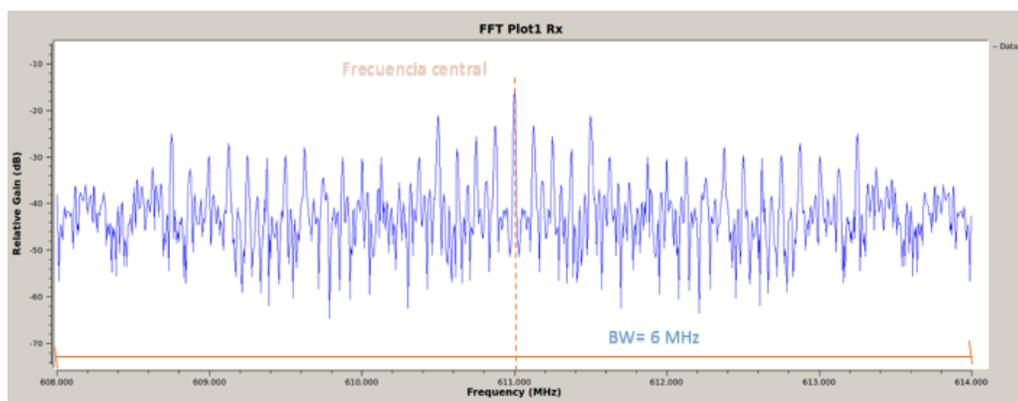


Figura 49. Gráfica a la salida de la demodulación OFDM

3.3.3 Demodulación Digital



Figura 50. Bloque de la etapa de demodulación digital

En la tabla 14 se describe el bloque utilizado para la demodulación digital.

Tabla 14

Propiedades del bloque de la demodulación digital

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Constellation Decoder</i>, decodifica los puntos de una constelación de un espacio complejo a bits en función del mapa del objeto haciendo un desempaqueado de los datos, además realiza la demodulación utilizando la misma variable que usa el objeto <i>digital.constellation_bpsk()</i>.</p>

3.3.4 Decodificación de Canal

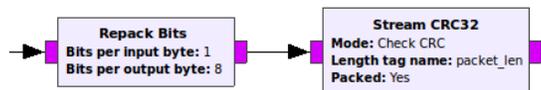
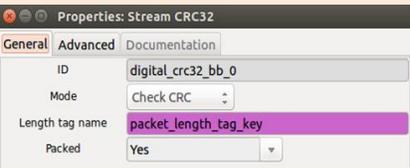


Figura 51. Bloques de la decodificación de canal

En la tabla 15 se describe los bloques utilizados para la decodificación de canal.

Tabla 15

Propiedades del bloque de la decodificación de canal

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Repack Bits</i>, vuelve a empaquetar los bits de la secuencia de entrada en los bits de la secuencia de salida. No se pierden bits aquí.</p> <p>El algoritmo de Viterbi es un algoritmo que permite encontrar la secuencia más factible que produce una secuencia de sucesos, se aplica en la decodificación de códigos convolucionales usado en las redes inalámbricas, por lo que Viterbi consigue la decodificación óptima, la cual se realiza en el bloque <i>Packet Header Parser</i> en la figura 55.</p> <p>El bloque <i>Stream CRC32</i> en el receptor, se debe escoger en el parámetro <i>Mode</i> la opción <i>Check CRC</i>, para poder chequear los bits de redundancia cíclica adjuntados en los paquetes emitidos en el transmisor y poder quitarlos.</p>

3.3.5 Datos de Salida

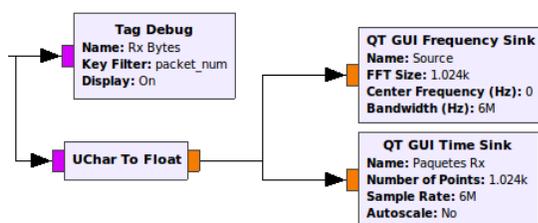
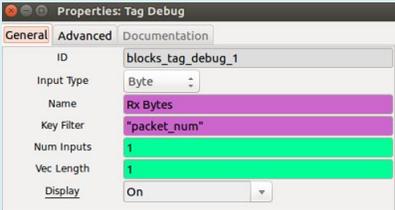


Figura 52. Bloques de la etapa de Datos de Salida

En la tabla 16 se describe los bloques utilizados en la salida de datos.

Tabla 16

Propiedades del bloque de los datos de salida

Bloques	Propiedades
	<p>El bloque <i>Tag Debug</i>, se utiliza para filtrar los paquetes a través de un nombre de etiqueta, para lo cual se filtrara por número de paquete.</p>

La figura 53 representa la señal en el dominio de la frecuencia a la salida del receptor obtenida del bloque *QT GUI Frequency Sink*, esta señal es similar a la señal de entrada en el transmisor en la figura 32, por lo que se puede decir que los datos llegaron sin pérdidas.

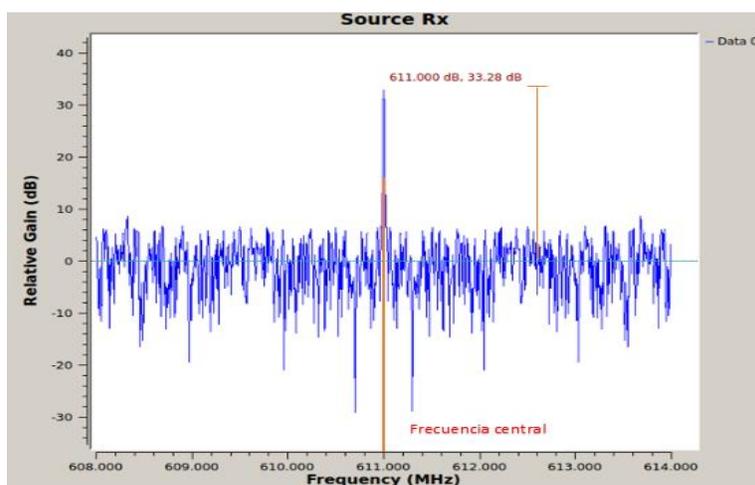


Figura 53. Gráfica a la salida del receptor en el dominio del tiempo

La figura 54 representa la señal en el dominio del tiempo a la salida del receptor en el bloque *QT GUI Time Sink*, en donde se puede notar que los paquetes han sido recibidos con éxito y que se encuentran etiquetados con la longitud de 50 bytes como en la gráfica de paquetes enviados de la figura 31.

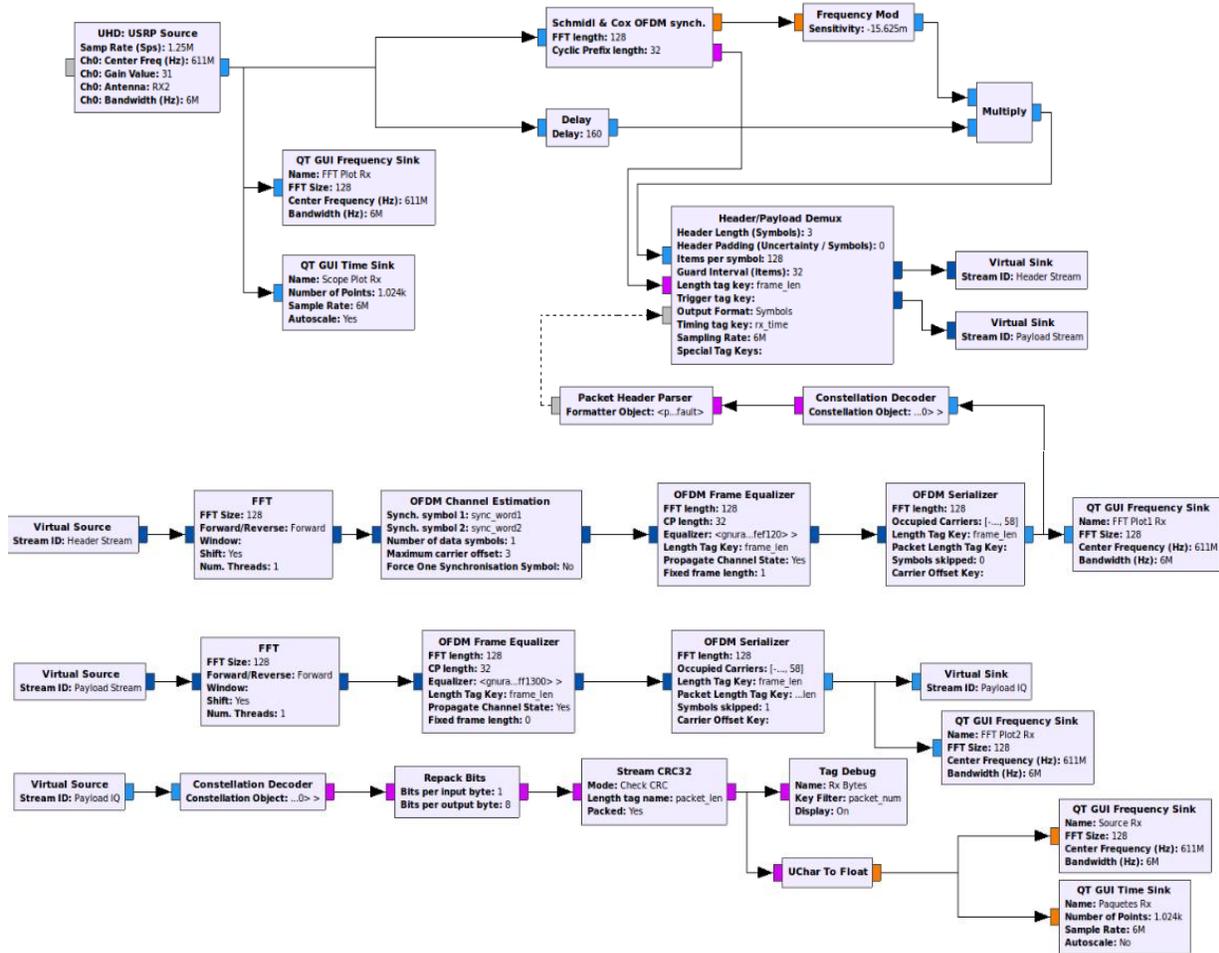


Figura 55. Diagrama completo del receptor en GNU Radio

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe el funcionamiento del transmisor y receptor, para evaluar su desempeño mediante parámetros de distancia, tasa de error de bit, el ancho de banda y la velocidad de transmisión. Además se implementó una interfaz que permite modificar algunos parámetros de configuración desde la consola mientras se ejecuta la simulación.

4.1. Implementación del Sistema

Para implementar el sistema Wi-Fi basado en el estándar 802.11af se utilizó dos equipos USRP-2920 que fueron provisto por el laboratorio de Televisión digital en la “Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”, también se contó con dos computadores con sistema operativo Ubuntu en el cual se encuentra instalado el software GNU Radio Companion que se utilizó para el desarrollo del programa en el transmisor y receptor.

En la figura 56 se puede observar el entorno en el que se implementó el sistema.



Figura 56. Entorno del sistema

Al momento de ejecutar el programa se muestra una interfaz de usuario en el que se puede configurar diferentes parámetros, como la velocidad de transmisión o recepción, el ancho de banda del canal y la frecuencia de transmisión o recepción. La configuración del transmisor y receptor se basa en las características de la capa física del estándar 802.11af como se observa en la Tabla 1.

La interfaz gráfica cuenta con dos opciones para poder elegir a que frecuencia transmitir los datos, cabe recalcar, que estas frecuencias son espacios en blanco dentro del espectro radioeléctrico de 54 MHz a 698 MHz designados por la Arcotel en las bandas de VHF y UHF, por lo que son frecuencias libres que no se encuentran brindando ningún servicio, ya que el sistema se basa en TVWS.

Como se observa en la figura 57, gran parte del espectro se encuentra asignado para otros servicios.

Servicios Operando	Frecuencia Inicial – Frecuencia Final	Banda
RADIODIFUSIÓN	54 MHz - 68 MHz	VHF
EQA.15 (Emisiones de televisión)		
RADIODIFUSIÓN	68 MHz – 72 MHz	VHF
EQA.15 (Emisiones de televisión)		
RADIODIFUSIÓN	76 MHz – 88 MHz	VHF
EQA.20 (Emisiones de televisión)		
RADIODIFUSIÓN	88 MHz – 100 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN	100 MHz – 108 MHz	VHF
RADIODIFUSIÓN	174 MHz – 216 MHz	VHF
EQA.35 (Emisiones de televisión)		
RADIODIFUSIÓN	512 MHz – 608 MHz	UHF
EQA.65 (Emisiones de televisión)		
RADIODIFUSIÓN	614 MHz – 698 MHz	UHF
(Emisiones de Radiodifusión) EQA.70 5.311*		

Figura 57. Frecuencias de operación de servicios VHF y UHF

Fuente: (Vásquez, 2018)

Pero existen espacios entre canales adyacentes como se mira en el rectángulo azul de la figura 58 en donde hay un canal con ancho de banda de 6 MHz entre las frecuencias de 608 MHz y 614 MHz, siendo la frecuencia central de 611 MHz, debido a Arcotel en Ecuador se utiliza canales con anchos de banda de 6 MHz, por lo tanto se utilizará para las pruebas de desempeño la opción de ancho de banda de 6 MHz aunque también se integró en la interfaz los ancho de banda de 7 MHz y 8 MHz como opcionales para futuros trabajos.

La frecuencia con la que se trabajará es de 611 MHz, además en la interfaz se añadió otra frecuencia opcional de 111 MHz que igualmente es un espacio en blanco dentro del espectro radioeléctrico, como se aprecia en la figura 57.

	32 (578-584)
	33 (584-590)
	34 (590-596)
	35 (596-602)
	36 (602-608)
	38 (614-620)
	39 (620-626)
	40 (626-632)
	41 (632-638)

UHF 614-644 IV

Figura 58. Parámetros a configurar en la interfaz

La velocidad de transmisión se obtuvo mediante pruebas realizadas del envío de datos, mientras se varía la tasa de muestreo, por lo tanto se obtuvo un valor de 10 Mbps máximo de velocidad de transmisión, en el apartado 4.2 se observa en más detalle cómo se realizó las pruebas para lograr encontrar la velocidad de transmisión máxima.

En la figura 59 se presenta la interfaz gráfica de usuario, que se implementó tanto en el transmisor y el receptor.



Figura 59. Parámetros a configurar en la interfaz

4.2. Velocidad de transmisión

Para obtener la velocidad máxima de transmisión se hicieron varias medidas dependiendo de la tasa de muestreo Sps (muestras por segundo), que es el parámetro del USRP que indica hasta cuantas muestras puede soportar enviar por segundo.

Por lo tanto lo que se hizo es variar la tasa de muestreo y dependiendo del número de muestras enviadas se determina hasta que tasa de muestreo el transmisor soporta él envío.

Para lo cual se tiene la tabla 17 con los datos obtenidos de las pruebas realizadas.

Tabla 17

Velocidad de transmisión

# Muestras Enviadas	Soporta el envío	Tasa de Muestreo (Sps)	Velocidad (bits/s)
2000	Si	225 k	1,8 Mb/s
3000	Si		
2000	Si	450 k	3,6 Mb/s
3000	Si		
2000	Si	675 k	5,4 Mb/s
3000	Si		
2000	Si	925 k	7,4 Mb/s
3000	Si		
2000	Si	1,25 M	10 Mb/s
3000	Si		
2000	No	1,5 M	12 Mb/s
3000	No		

A partir de los 1,5 MSps el hardware del equipo USRP no soporta la tasa de muestreo al momento de ejecutar el programa independientemente del número de muestras enviadas. Por lo cual se procedió a calcular la velocidad de transmisión máxima que puede soportar la implementación con el equipo USRP.

Se utiliza la siguiente ecuación (2) para el cálculo de la velocidad máxima de transmisión:

$$\text{Velocidad de transmisión (bits/s)} = \text{Tasa de Muestro} \times \frac{8 \text{ bits}}{1 \text{ muestra}} \quad (2)$$

Por ejemplo, la tasa de muestreo máxima que soportó el equipo USRP según las medidas realizadas fue de 1,25 MSps, de manera que la máxima velocidad de transmisión se logra calcular de la siguiente forma:

$$\text{Velocidad de transmisión (bits/s)} = 1,25 \text{ MSps} \times \frac{8 \text{ bits}}{1 \text{ muestra}} \quad (3)$$

$$\text{Velocidad de transmisión (bits/s)} = 1,25 \times \frac{1000000 \text{ muestras}}{\text{segundo}} \times \frac{8 \text{ bits}}{1 \text{ muestra}} \quad (4)$$

$$\text{Velocidad de transmisión (bits/s)} = 10 \text{ Mb/s} \quad (5)$$

Debido al hardware del USRP no es posible obtener una mayor velocidad de transmisión (bit/s), puesto que si se sigue aumentando la velocidad para transmitir las muestras por segundo en el USRP del transmisor el equipo muestra un mensaje al momento de ejecutar el programa de que no es posible la ejecución debido a conflictos con el hardware del equipo USRP. Por lo tanto solo se utilizó una velocidad de transmisión máxima de 10 Mbps.

4.3. Tasa de Error de Bit (BER)

La tasa de error de bit, BER (en inglés, *Bit Error Rate*), se especifica como el número de bits recibidos erróneamente a la salida del receptor, respecto al número de bits totales enviados desde la entrada del transmisor a través de un intervalo de tiempo.

Para obtener el valor del BER se realizó algunas capturas de datos a una distancia de prueba de 8 metros entre los equipos como se observa en la figura 60, para determinar el número de paquetes recibidos en el receptor.



Figura 60. Diagrama de envío y recepción de datos

A través del panel de consola en el receptor se puede observar los paquetes que se reciben como se observa en la figura 61.

```

Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 850 Source: n/a Key: packet_num Value: 17

Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 900 Source: n/a Key: packet_num Value: 18

Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 950 Source: n/a Key: packet_num Value: 19

Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 1000 Source: n/a Key: packet_num Value: 20

```

Figura 61. Panel de consola en el Computador Rx

Nota: En caso de que un paquete no llegue, la consola en el computador Rx muestra una sintaxis de error.

```

Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 4850 Source: n/a Key: packet_num Value: 0
-----
INFO: Detected an invalid packet at item 4704
INFO: Parser returned #f
-----
Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 4950 Source: n/a Key: packet_num Value: 2
-----
Tag Debug: Rx Bytes
Input Stream: 00
Offset: 5000 Source: n/a Key: packet_num Value: 3
-----

```

Figura 62. Pérdida de un paquete en el Computador Rx

Para calcular el BER se utiliza la siguiente ecuación:

$$BER = \frac{\text{Bits Erróneos}}{\text{Bit Transmitidos}} \quad (6)$$

Después de la toma de datos en el panel de consola en la recepción mediante 6 diferentes pruebas a una distancia fija de prueba de 8 metros utilizando las modulaciones BPSK , QPSK y 16-QAM, se procedió a realizar las tablas con los valores obtenidos.

Tabla 18

Evaluación del BER en BPSK

Paquetes Transmitidos	Paquetes Recibidos	Paquetes Erróneos	BER
20	20	0	0
50	50	0	0
100	100	0	0
200	200	0	0
300	300	0	0
400	400	0	0

Tabla 19*Evaluación del BER en QPSK*

Paquetes Transmitidos	Paquetes Recibidos	Paquetes Erróneos	BER
20	20	0	0
50	50	0	0
100	100	0	0
200	200	0	0
300	300	0	0
400	400	0	0
500	499	0	0

Como se puede apreciar en la tabla 18 y 19, no existieron paquetes erróneos por lo que prácticamente no hubo valores de BER, esto se debe a las modulaciones BPSK y QPSK que son modulaciones robustas, menos vulnerables a interferencias.

Tabla 20*Evaluación del BER en 16-QAM*

Paquetes Transmitidos	Paquetes Recibidos	Paquetes Erróneos	BER
20	20	0	0
50	50	0	0
100	100	0	0
200	200	0	0
300	300	0	0
400	400	0	0
500	499	1	2×10^{-3}

En la tabla 20 si hubo paquetes perdidos debido a que la modulación empleada es menos robusta que una M-PSK, por lo que para calcular el BER se procede a utilizar la ecuación (6).

Hay que tomar en cuenta que cada paquete está conformado de 50 bytes y cada byte está formado por 8 bits.

$$BER = \frac{1 \times 50 \times 8}{500 \times 50 \times 8} \quad (7)$$

$$BER = 2 \times 10^{-3} \quad (8)$$

La probabilidad de error de bit erróneo da a conocer la calidad de un enlace mediante el número de bits que no se reciben correctamente en un flujo de datos. Este indicador va a depender de la modulación.

Como se pudo apreciar en los resultados de las tablas 18,19 y 20, se puede concluir que las modulaciones digitales BPSK y QPSK por ser modulaciones más robustas ante interferencias no obtuvieron una tasa de error de bit (BER) en comparación con 16-QAM que si obtuvo un paquete perdido en la recepción.

4.3. Distancia del enlace

Se procedió a la toma de paquetes recibidos mediante escenarios de pruebas de laboratorio con cada una de las modulaciones para poder obtener los valores del BER, y conocer que tan confiable es la red implementada mediante la variable de la distancia. Para lo cual se va a modificar la distancia entre el transmisor y receptor. En la figura 63 se muestra el diagrama de implementación.



Figura 63. Diagrama de pruebas en factor de distancia

Como se observa en la tabla 21 tanto las modulaciones BPSK como QPSK tienden a recibir los paquetes a una mayor distancia sin pérdidas, pero en cambio la modulación 16-QAM tiende a perder paquetes más pronto que las demás modulaciones.

Tabla 21

Evaluación de la distancia vs el BER en las modulaciones

Distancia (m)	Modulación Digital	Paquetes Transmitidos	Paquetes Recibidos	Paquetes Erróneos	BER
2	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	3000	0	0
	16-QAM	3000	3000	0	0
4	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	3000	0	0
	16-QAM	3000	3000	0	0
6	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	3000	0	0
	16-QAM	3000	3000	0	0
8	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	3000	0	0
	16-QAM	3000	2999	1	$0,33 \times 10^{-3}$
10	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	3000	0	0
	16-QAM	3000	2997	3	1×10^{-3}
12	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	2999	1	$0,33 \times 10^{-3}$
	16-QAM	3000	2997	3	1×10^{-3}
14	BPSK	3000	3000	0	0
	QPSK	3000	2999	1	$0,33 \times 10^{-3}$
	16-QAM	3000	2996	4	$1,33 \times 10^{-3}$
16	BPSK	3000	2999	1	$0,33 \times 10^{-3}$
	QPSK	3000	2998	2	$0,66 \times 10^{-3}$
	16-QAM	3000	2996	4	$1,33 \times 10^{-3}$

En la figura 64 se observa de mejor manera la curva de la función distancia vs BER de las tres modulaciones, con la cual se concluye que la modulación BPSK es la que presenta mayor desempeño debido que tiene una mayor distancia de operación sin perder datos.

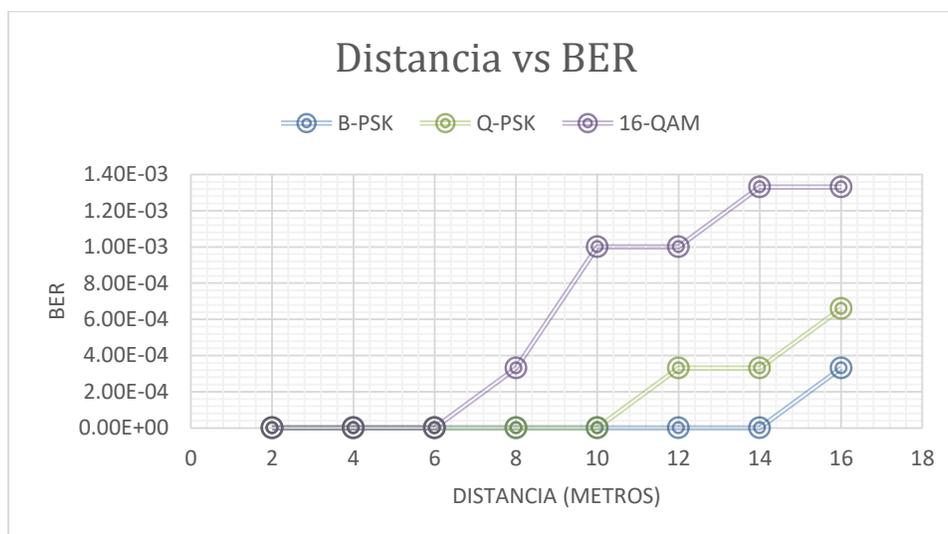


Figura 64. Distancia vs BER

En la práctica se logró mediante pruebas de laboratorio apreciar que mientras la distancia sea menor entre los equipos USRP se va a tener un mejor desempeño de la red debido a que no se encuentran con interferencias y los datos enviados se receptan con eficiencia sin ninguna tasa de bit erróneos.



Figura 65. Distancia mínima de prueba entre el transmisor y el receptor

Y mientras se van alejando los equipos USRP a una distancia mayor se pudo observar que en la modulación 16-QAM se pierde bits en la recepción.



Figura 66. Distancia de prueba de 8m entre el transmisor y el receptor

En la figura 67 se observa el funcionamiento del transmisor y receptor en un escenario de prueba de laboratorio a mayor distancia, recalando la figura 64 que entre mayor sea la distancia mayor cantidad de bits se pierden.

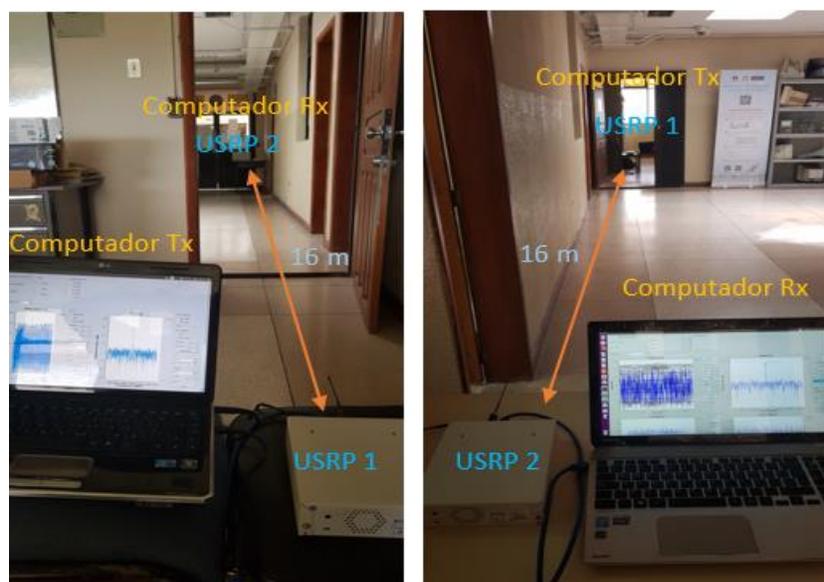


Figura 67. Distancia de 16 m entre el transmisor y el receptor

4.4. Comparación entre el Transmisor y Receptor

Se procede a comparar las gráficas obtenidas en el transmisor y receptor para una prueba de transmisión de 20 paquetes de datos a una distancia de prueba de 8 metros. Se observa en la consola del transmisor los paquetes enviados en la figura 68, además para mayor entendimiento se agrega un código QR con un link a un video demostrativo del transmisor.

```

Tag Debug: Paquetes TxInput Stream: 00
Offset: 0 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 50 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 100 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 150 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 200 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 250 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 300 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 350 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 400 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 450 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 500 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 550 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 600 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 650 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 700 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 750 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 800 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 850 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 900 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
Offset: 950 Source: n/a Key: packet_len Value: 50
----->>> Done

```

Código Interactivo



Figura 68. Paquetes enviados en el transmisor y ejecución del programa

En el panel de control del receptor, en cambio se observa los 20 paquetes recibidos en la figura 69. Se agrega un código QR con un link a un video demostrativo del receptor.

```

Source: n/a      Key: packet_num  Value: 0-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 50
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 1-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 100
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 2-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 150
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 3-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 200
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 4-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 250
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 5-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 300
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 6-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 350
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 7-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 400
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 8-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 450
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 9-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 500
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 10-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 550
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 11-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 600
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 12-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 650
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 13-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 700
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 14-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 750
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 15-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 800
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 16-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 850
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 17-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 900
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 18-----
Tag Debug: Rx BytesInput Stream: 00 Offset: 950
Source: n/a      Key: packet_num  Value: 19-----

```

Código Interactivo



Figura 69. Paquetes recibidos en el receptor y ejecución del programa

En la figura 70, se observa que el número de paquetes transmitidos y recibidos obtenidos de la simulación del transmisor y receptor implementado mediante GNU Radio son iguales sin perder los paquetes por la distancia.

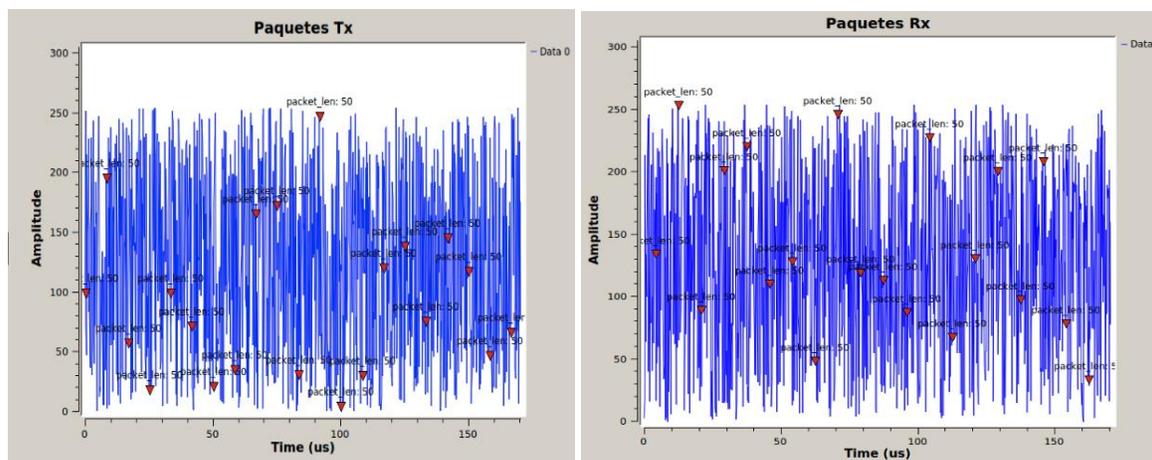


Figura 70. Gráfica de los paquetes transmitidos y recibidos

Se puede apreciar en la figura 71, la señal de entrada del transmisor y la señal de salida del receptor en el dominio de la frecuencia, cuya frecuencia central es de 611 MHz la cual es una frecuencia libre en TVWS y ancho de banda de 6 MHz.

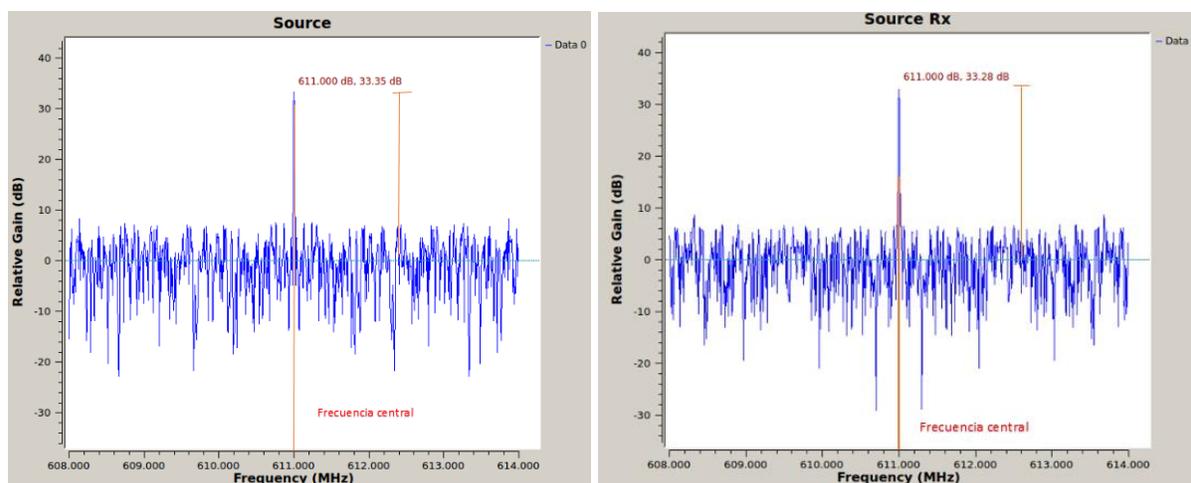


Figura 71. Gráfica de la señal de entrada del Tx y de la salida del Rx

Sí ambas señales se superponen como se observa en la figura 72, se puede apreciar que son parecidas por lo que se concluye que en la transmisión y recepción de paquetes no hubo pérdidas.

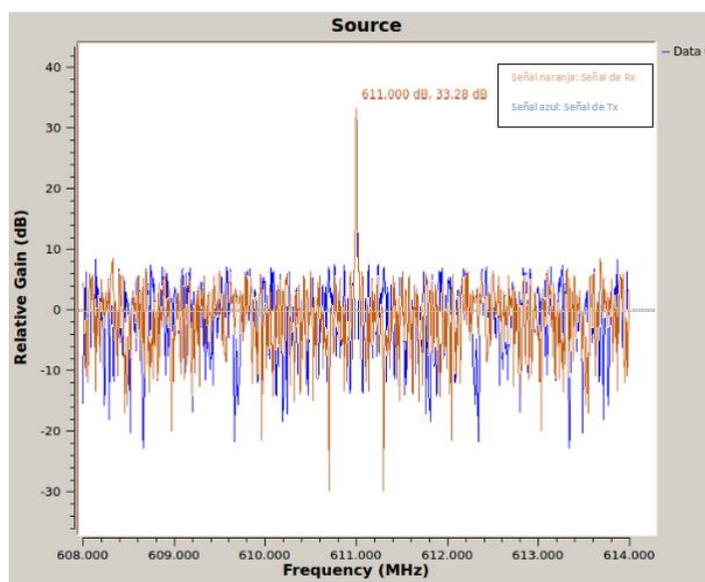


Figura 72. Gráfica de la señal Tx y Rx superpuestas

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El USRP-2920 es un transceptor confiable y flexible que permite a un computador generar sistemas de comunicaciones inalámbricos, estos equipos han ido creciendo a medida que las plataformas han mejorado sus características técnicas para el desarrollo de diversos sistemas de radio por software.

Los equipos USRP-2920 fueron de gran ayuda en la implementación del sistema 802.11af, dado que gran parte de sus funciones son programadas mediante software a través de una computadora, lo que da como resultado un bajo coste para el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones.

El programa GNU Radio cuenta con bloques para el procesamiento de señales lo cual facilitó el diseño del transmisor y receptor, debido a su fácil entorno gráfico y capacidad de simulación.

A través de la implementación de los parámetros del estándar 802.11af es posible utilizar la frecuencia TVWS (611 MHz) para la transmisión de datos, sin la necesidad de contar con licencia de espectro.

Una de las características principales dentro del estándar 802.11af es la utilización de la modulación OFDM, debido a que es ideado para combatir la interferencia entre símbolos resultado de la propagación multitrayecto característica de los medios de transmisión inalámbrica, además optimiza el uso del espectro.

De los resultados de simulación, tanto en el transmisor como en el receptor a una distancia corta de 8 metros, se pudo observar en consola que los paquetes transmitidos llegaron al receptor sin pérdidas de paquetes como se observa en las figuras 68 y 69.

Utilizando las modulaciones digitales BPSK y QPSK no se obtuvieron paquetes perdidos en el receptor para distancias inferiores a los 12 metros, debido a que se tratan de modulaciones más robustas frente a las interferencias y a los ruidos, en comparación con la modulación 16-QAM que se comienzan a evidenciar pérdidas de paquetes desde una distancia de 8 metros.

Las pruebas de desempeño se realizaron con una velocidad de 10 Mbps dado que es la velocidad máxima obtenida con el USRP-2920.

El ancho de banda ocupado en la implementación es de 6 MHz dada la normativa de Ecuador, debido a que si se utilizan los anchos de banda de 7 MHz y 8 MHz pueden ocasionar interferencias de canal adyacente.

Se puede determinar que la red tiene un desempeño favorable debido que tasa de error de bit para BPSK y QPSK es de 0 hasta una distancia de 12 metros mientras que para 16-QAM es de 1×10^{-3} .

Los prototipos permitirán en futuros proyectos diseñar pruebas de laboratorio de interferencia de canal adyacente entre TVWS y la televisión analógica o digital.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda usar computadores que cuenten solo con el sistema operativo basado en Linux y no utilizar máquinas virtuales, debido a que se tiene el efecto de disminuir la velocidad y el rendimiento en la transmisión de datos, logrando mayor tiempo en el procesamiento de señales.

En caso que el computador no cuente con un puerto Gigabit-Ethernet se recomienda utilizar un adaptador USB 3.0 a Gigabit Ethernet, dado que solo a través de la conexión con una interfaz Gigabit-Ethernet se puede lograr la comunicación con el equipo USRP.

Se recomienda utilizar los equipos USRP-2945 o 2955 si se requiere una mayor velocidad de transmisión debido a que son equipos más robustos y avanzados en el procesamiento de señales.

BIBLIOGRAFÍA

- Arreaga, C. (2015). *IEEE 802.11*. Obtenido de <https://prezi.com/cpbaeuqpnwrrp/arquitectura-y-servicios-de-ieee-80211/>
- Arteaga. (2016). *Todo lo que necesitas saber del WiFi AD, WiFi AH y HaLow*. Obtenido de <https://computerhoy.com/noticias/internet/todo-que-necesitas-saber-del-wifi-ad-wifi-ah-halow-39101>
- Arteaga, A. (2012). *Arquitectura de un Sistema de Monitoreo Radioeléctrico usando Software Defined Radio*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4115/411534391005.pdf>
- Artieda, L., & Coronel, M. (2014). *Análisis de implementación en Ecuador de Sistemas basados en el estándar IEEE 802.22*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/101992/D-84450.pdf>
- Beltran, L. (2016). *Diseño, simulación y análisis de redes Wi-fi que operan en los espacios en blanco de televisión utilizando radio cognitiva*. Obtenido de http://oa.upm.es/43260/1/PFC_LIANNE_LAMORENA_BELTRAN_2016.pdf
- Bustillos, O. (2016). *Estudio de Técnicas de Modulación mediante Radios NI USRP*. Tesis de Grado, Monterrey-Mexico.
- Campoverde, V., & Arizaga, G. (2017). *Medición, modelamiento y determinación de la disponibilidad de canales de TV analógica de la banda UHF (512 MHz – 698 MHz) en un escenario indoor en un edificio en el norte de la ciudad de Guayaquil*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/38551>
- Cardenas, M., & Navarro, E. (2017). *Implementación de sistema de comunicación inalámbrica usando GNU Radio y USRP*. Obtenido de http://pie.fc.uaslp.mx/estudiantes/PropuestasMIE2017/PropuestaTesisM_Cardenas-Stevens-1.pdf
- Castañeda, P., & Guerrero, C. (2015). *Television White Space*. Obtenido de http://www.academia.edu/26348239/Television_White_Space
- Castillo, C. (2014). *Codificación de Canal*. Obtenido de http://www.academia.edu/32033614/CODIFICACION_DE_CANAL

- Cuevas, J. (2017). *Espacios blancos de la TV para zonas rurales*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/318279621_Espacios_blanco_s_de_la_TV_para_zonas_rurales
- Fernández, F. (2008). *SDR: Equipos de radio definido por Software*. Obtenido de <http://www.ealuro.com/sdr1/sdr.htm>
- Flores, A., Guerra, R., & Knightly, E. (2013). *IEEE 802.11af: A standard for TV White Space Spectrum Sharing*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/260670622_IEEE_80211af_A_standard_for_TV_white_space_spectrum_sharing
- Gómez, C. (2013). *Banda ancha en espacios blancos*. Obtenido de https://es.slideshare.net/ANE_Colombia/tvws-uit-c-gomez
- Hernandez, E. (2008). *Modulación Digital*. Obtenido de <https://www.uv.es/~hertz/hertz/Docencia/teoria/Trasmdigital.pdf>
- Hernández, P., & Carro, G. (2016). *Principios, normas y soluciones de Radio Cognitiva*. Obtenido de https://iee.fing.edu.uy/proyectos/esopo/wp-content/uploads/sites/3/2017/01/Doc4_20170118_CognitiveRadio.pdf
- Jimenez, O. (2013). *Codificación convolucional*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/jimenezrevelo/codificacin-convolucional-decodificador-de-viterbi-y-turbo-cdigo>
- Lekomtcev, D. (2015). *Comparison of 802.11af and 802.22 standards-physical layer and cognitive functionality*. Obtenido de https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiQtNjjme_fAhUGU98KHZeBCGEQFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.elektrorevue.cz%2Fen%2Fdownload%2Fcomparison-of-802-11af-and-802-22-standards--physical-layer-and-cognitive-function
- Mares, J. (2015). *Estandar para WIFI 2.0 WhiteFI*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/jorgedavidmaressanchez/ieee-80211af>

- Martínez, R., & Calvo, M. (2008). *Codificación de Canal*. Obtenido de <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-5-CodificacionBloques.pdf>
- Martino, L. (2012). *Códigos convolucionales*. Obtenido de <http://www.lucamartino.altervista.org/ConvolucionalesPractica3.pdf>
- McCann, S., & Ashley, A. (2019). *Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines*. Obtenido de http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm
- Mohammed, E. Y. (2012). *Acceso a Internet vía Wifi-Wimax*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15906/pfc_mohammed_el-yaagoubi_2012.pdf
- Moreno, R. (2013). *Transmisión multiportadora sin prefijo cíclico para comunicaciones radio de alta capacidad*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/19824/TFG_Raul_Moreno_Garcia.pdf
- National Instrument*. (2015). Obtenido de Getting started guide NI USRP-2920/2921/2922 Universal Software Radio Peripheral: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>
- National Instruments*. (2017). Obtenido de <https://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>
- Pelechano, F. (2013). *802.11AF WHITE-FI*. Obtenido de <http://www.pelechano.com/2013/10/802-11af-white-fi/>
- Pinar, I. (2015). *USRP*. Obtenido de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11984/fichero/Volumen+4_USRP%252FUSRP.pdf
- Sanchez, A. (2015). *La radio definida por software: Recepción de las comunicaciones tierra-aire dentro de la banda aeronáutica*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/83161/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, C., Lopez, W., & Rocha, C. (2007). *Sistemas de comunicación inalámbrica MIMO-OFDM*. Obtenido de <http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v3n4/v3n4a09.pdf>
- Vásquez, D. (2018). *Análisis y propuesta técnica para el despliegue e implementación de TV White Space en Ecuador*. Obtenido de

- <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/13932/T-ESPE-057558.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vega, C. (2015). *Codificación de Canal*. Obtenido de <http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Codificacion%20de%20Canal.pdf>
- Villagómez, C. (2017). *Verificación de errores*. Obtenido de <https://es.ccm.net/contents/59-verificacion-de-errores>
- Yera, L. (2015). *Estándares para la realización práctica de la Internet de las cosas*. Obtenido de <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4509/Lisdeybi%20Maury%20Yera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yunquera, J. (2012). *El Estándar IEEE 802.11*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11138/fichero/memoria%252FCap%C3%ADtulo+3.pdf+>
- Zhou, L. (2013). *Design and Implementation of a Wi-Fi Prototype System in TVWS based on IEEE 802.11af*. National Institute of Information and Communication Technology. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6554657>