



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E  
INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

**Tema:**

---

**“SISTEMA DE COMUNICACIONES EMPLEANDO SDR PARA PRÁCTICAS  
MULTIDISCIPLINARIAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN  
ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA  
DE AMBATO”**

---

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

**ÁREA:** Comunicaciones

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Tecnologías de la Comunicación

**AUTOR:** Vanessa Aracely Balseca Acuña

**TUTOR:** Ing. Juan Pablo Pallo, Mg.

**Ambato - Ecuador**

**Marzo – 2021**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: SISTEMA DE COMUNICACIONES EMPLEANDO SDR PARA PRÁCTICAS MULTIDISCIPLINARIAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por la señorita Vanessa Aracely Balseca Acuña, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y el numeral 7.4 del respectivo instructivo.

Ambato, marzo 2021.



Ing. Juan Pablo Pallo, Mg.  
TUTOR

## AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: SISTEMA DE COMUNICACIONES EMPLEANDO SDR PARA PRÁCTICAS MULTIDISCIPLINARIAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO es absolutamente original, auténtico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, marzo 2021.



---

Vanessa Aracely Balseca Acuña

0503600041

AUTOR

## **APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO**

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por la señorita Vanessa Aracely Balseca Acuña, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado **SISTEMA DE COMUNICACIONES EMPLEANDO SDR PARA PRÁCTICAS MULTIDISCIPLINARIAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO** nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 17 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y al numeral 7.6 del respectivo instructivo. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidenta del Tribunal.



Ambato, marzo 2021.

Ing. Pilar Urrutia, Mg.

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL



Ing. Marco Jurado, Mg.  
PROFESOR CALIFICADOR



Ing. Patricio Córdova, Mg.  
PROFESOR CALIFICADOR

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación en favor de la Universidad Técnica de Ambato, con fines de difusión pública. Además, autorizo su reproducción total o parcial dentro de las regulaciones de la institución.

Ambato, marzo 2021.



Vanessa Aracely Balseca Acuña

0503600041

AUTOR

## **DEDICATORIA:**

A mi familia, de manera especial a mi padre Rafael Acuña quien me enseño que nunca hay darse por vencido y pelear todas las batallas sin importar el resultado.

Vanessa Aracely Balseca Acuña

## **AGRADECIMIENTO:**

Agradezco a Dios por guiar me en cada paso que doy, a mis padres Sandra y Raúl, a mi hermano Saúl por su infinito amor y paciencia en cada etapa de mi vida, a la Universidad por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y al Ingeniero Juan Pablo Pallo por colaborar con sus consejos y conocimientos para el desarrollo del proyecto.

Vanessa Aracely Balseca Acuña

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR .....	ii
AUTORÍA .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DE LA COMISIÓN CALIFICADORA .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
CAPÍTULO I .....	3
MARCO TEÓRICO .....	3
1.1. Antecedentes Investigativos .....	3
1.2. Contextualización del problema .....	6
1.3. Fundamentación teórica .....	8
Radio Definido por Software (SDR) .....	8
Esquema Genérico de SDR .....	9
Arquitectura de un Sistema SDR .....	11
Características de SDR .....	11
Hardware para SDR .....	13
Dispositivo USRP N210 .....	14
Arquitectura del USRP N210 .....	16
Software para SDR .....	18

1.4. Objetivos .....	21
1.4.1. Objetivo General.....	21
1.4.2. Objetivos Específicos .....	21
1.4.3. Descripción de los objetivos.....	21
CAPÍTULO II .....	24
METODOLOGÍA .....	24
2.1. Materiales .....	24
2.1.1. Hardware: .....	24
2.1.2. Software: .....	26
2.2. Métodos.....	28
2.2.1. Modalidad de la Investigación.....	28
2.2.2. Recolección de la Información .....	28
2.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos .....	29
2.2.4. Desarrollo del proyecto.....	29
CAPÍTULO III .....	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
3.1. Análisis y discusión de los resultados.....	30
3.2. Desarrollo de la propuesta.....	34
3.2.1. Comunicación entre hardware y software de SDR .....	34
3.2.2. Esquema de un sistema de comunicación basado en SDR empleando los dispositivos USRP N210 .....	36
3.2.3. Desarrollo de prácticas .....	38
Práctica N°1 .....	38
Práctica N°2 .....	41
Práctica N°3 .....	46
Práctica N°4 .....	50
Práctica N°5 .....	52

Práctica N°6 .....	55
Práctica N°7 .....	57
Práctica N°8 .....	61
Práctica N°9 .....	63
Práctica N°10 .....	65
3.2.4. Verificación de resultados .....	70
Práctica N°1: Conexión entre GNU Radio y USRP N210.....	70
Práctica N°2: Manejo de herramientas de GNU Radio.....	72
Práctica N° 3: Transmisor y receptor AM .....	78
Práctica N°4: Inhibidor de Señales .....	85
Práctica N°5: Transmisor y receptor FM .....	86
Práctica N°6: Perturbaciones de la Señal .....	89
Práctica N°7: Modulación y Demodulación Digital M-PSK .....	92
Práctica N°8: Modulación y demodulación digital 4QAM.....	99
Práctica N°9: Técnica de reducción de PAPR en OFDM.....	101
Práctica N°10: Red GSM .....	104
3.2.5. Interfaz.....	106
CAPÍTULO IV.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
4.1. CONCLUSIONES .....	108
4.2. RECOMENDACIONES .....	110
MATERIALES DE REFERENCIA .....	111
Referencias Bibliográficas .....	111
ANEXOS .....	116
ANEXO A: Datasheet USRP N210.....	117
ANEXO B: Datasheet Antena VERT 900. ....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Aspectos principales de un sistema SDR .....	9
<b>Tabla 2.</b> Bloques de una arquitectura básica SDR .....	10
<b>Tabla 3.</b> Características técnicas del USRP N210 .....	15
<b>Tabla 4.</b> Conectores del panel frontal del USRP N210.....	16
<b>Tabla 5.</b> Leds indicadores del USRP N210.....	16
<b>Tabla 6.</b> Herramientas de QT GUI.....	20
<b>Tabla 7.</b> Herramientas de WX GUI.....	21
<b>Tabla 8.</b> Características Técnicas de diversos modelos de USRP .....	24
<b>Tabla 9.</b> Características Técnicas de Antenas VERT.....	25
<b>Tabla 10.</b> Características de software para SDR.....	26
<b>Tabla 11.</b> Principales lenguajes de programación .....	27
<b>Tabla 12.</b> Análisis de Asignaturas para el desarrollo de prácticas.....	31
<b>Tabla 13.</b> Parámetros para la generación de señales.....	41
<b>Tabla 14.</b> Parámetros para un Analizador de Espectros UHF.....	44
<b>Tabla 15.</b> Parámetros del Transmisor AM. ....	46
<b>Tabla 16.</b> Parámetros para el Receptor AM. ....	48
<b>Tabla 17.</b> Parámetros para los índices de modulación AM.....	49
<b>Tabla 18.</b> Parámetros para el Receptor AM. ....	51
<b>Tabla 19.</b> Parámetros del Transmisor FM.....	52
<b>Tabla 20.</b> Parámetros para el receptor FM. ....	53
<b>Tabla 21.</b> Parámetros para las Perturbaciones de la señal.....	55
<b>Tabla 22.</b> Parámetros para reducción de PAPR. ....	64
<b>Tabla 23.</b> Canalización de las bandas de radiodifusión de televisión abierta .....	76
<b>Tabla 24.</b> Resultados del método para reducir el PAPR. ....	102
<b>Tabla 25.</b> Resultados de pruebas de la RED GSM.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Arquitectura Básica de un SDR .....	10
<b>Figura 2.</b> Arquitectura de un sistema SDR ideal.....	11
<b>Figura 3.</b> USRP N210. ....	14
<b>Figura 4.</b> Panel frontal del USRP N210.....	15
<b>Figura 5.</b> Arquitectura de hardware USRP N210. ....	17
<b>Figura 6.</b> Interfaz de GNU Radio.....	18
<b>Figura 7.</b> Tipos de variables GNU Radio.....	20
<b>Figura 8.</b> Proceso de la propuesta. ....	34
<b>Figura 9.</b> Asignación de dirección IP.....	35
<b>Figura 10.</b> Comprobación del comando uhd_find_devices. ....	35
<b>Figura 11.</b> Comprobación del comando uhd_usrp_probe.....	36
<b>Figura 12.</b> Sistema de comunicación basada en SDR empleando USRP N210. ....	36
<b>Figura 13.</b> Esquema de Conexión Física entre GNU Radio y USRP N210. ....	38
<b>Figura 14.</b> Pantalla de inicio de Ubuntu 16.04 LTE. ....	39
<b>Figura 15.</b> Identificación de sub red de USRP N210.....	40
<b>Figura 16.</b> Asignación de IP estática.....	40
<b>Figura 17.</b> Esquema de generación de ondas. ....	42
<b>Figura 18.</b> Generación de señal cosenoidal.....	42
<b>Figura 19.</b> Bloques QT GUI para análisis en frecuencia y tiempo. ....	43
<b>Figura 20.</b> Bloques WX GUI para análisis en frecuencia y tiempo. ....	44
<b>Figura 21.</b> Analizador de espectros UHF. ....	45
<b>Figura 22.</b> UHD USRP SOURCE para el Analizador UHF. ....	45
<b>Figura 23.</b> Bloque para la visualización de resultados del analizador UHF. ....	46
<b>Figura 24.</b> Transmisor AM. ....	47
<b>Figura 25.</b> Etapas del transmisor AM. ....	48
<b>Figura 26.</b> Receptor AM. ....	49
<b>Figura 27.</b> Esquema para índices de modulación AM. ....	50
<b>Figura 28.</b> Inhibidor de señal. ....	51
<b>Figura 30.</b> Receptor FM. ....	54
<b>Figura 31.</b> Implementación de la simulación del canal de comunicaciones. ....	56
<b>Figura 32.</b> Bloques para cálculo de potencias.....	56

<b>Figura 33.</b> Implementación Modulador M-PSK .....	57
<b>Figura 34.</b> Demodulador M-PSK.....	59
<b>Figura 35.</b> Sincronización entre TX Y RX. ....	60
<b>Figura 36.</b> Digitalización de la señal obtenida con PSK.....	60
<b>Figura 37.</b> Remuestreo para la constelación PSK. ....	61
<b>Figura 38.</b> Remuestreador de la señal analógica receptada en PSK. ....	61
<b>Figura 39.</b> Implementación Modulador 4QAM. ....	62
<b>Figura 40.</b> Demodulador 4QAM.....	63
<b>Figura 41.</b> Esquema de reducción de PAPR usando un codificador de canal. ....	65
<b>Figura 42.</b> Conexión entre GNU Radio y USRP N210.....	66
<b>Figura 43.</b> Plan de marcado.....	70
<b>Figura 44.</b> USRP N210 encontradas en la red. ....	71
<b>Figura 45.</b> Descripción de características técnicas del USRP conectado. ....	72
<b>Figura 46.</b> Espectro de la señal con QT GUI. ....	73
<b>Figura 47.</b> Constelación de la señal con QT GUI. ....	73
<b>Figura 48.</b> Análisis en tiempo con QT GUI. ....	74
<b>Figura 49.</b> Análisis en frecuencia con QT GUI. ....	74
<b>Figura 50.</b> Análisis en tiempo con WX GUI.....	75
<b>Figura 51.</b> Análisis en frecuencia con WX GUI. ....	75
<b>Figura 52.</b> Analizador de espectros UHF.....	77
<b>Figura 53.</b> Resultado del analizador de espectros. ....	78
<b>Figura 54.</b> Implementación del transmisor AM .....	79
<b>Figura 55.</b> Resultado de la Transmisión AM. ....	80
<b>Figura 56.</b> Modulación AM. ....	80
<b>Figura 57.</b> Implementación del receptor AM.....	81
<b>Figura 58.</b> Resultado del receptor AM.....	82
<b>Figura 59.</b> Esquema para índices de modulación.....	82
<b>Figura 60.</b> Modulación al 50%.....	83
<b>Figura 61.</b> Modulación al 100%.....	83
<b>Figura 62.</b> Modulación al 125%.....	84
<b>Figura 63.</b> Modulación al 175%.....	84
<b>Figura 64.</b> Implementación del inhibidor de señales. ....	85
<b>Figura 65.</b> Resultado del inhibidor de señales. ....	86

<b>Figura 66.</b> Implementación del transmisor FM.....	86
<b>Figura 67.</b> Resultado del transmisor AM.....	87
<b>Figura 68.</b> Implementación del receptor FM. ....	88
<b>Figura 69.</b> Resultado del Receptor FM. ....	88
<b>Figura 70.</b> Simulación del canal de comunicaciones. ....	89
<b>Figura 71.</b> Señal sin alteración. ....	90
<b>Figura 72.</b> Señal con ruido. ....	90
<b>Figura 73.</b> Valores de potencia RX y Tx con 700m de ruido de amplitud. ....	91
<b>Figura 74.</b> Valores de potencia RX y Tx con atenuación del 50 %. ....	91
<b>Figura 75.</b> Modulador M- PSK. ....	92
<b>Figura 76.</b> Respuesta de frecuencia con M: 2 .....	93
<b>Figura 77.</b> Constelación BPSK. ....	94
<b>Figura 78.</b> Respuesta de frecuencia con M: 4. ....	95
<b>Figura 79.</b> Constelación 4PSK. ....	95
<b>Figura 80.</b> Respuesta de frecuencia con M: 8. ....	96
<b>Figura 81.</b> Constelación 8PSK. ....	97
<b>Figura 82.</b> Demodulador M-PSK. ....	97
<b>Figura 83.</b> Constelación de la demodulación 4PSK.....	98
<b>Figura 84.</b> Constelación de la demodulación BPSK.....	99
<b>Figura 85.</b> Señal Transmitida.....	100
<b>Figura 86.</b> Resultado de la constelación 4 QAM. ....	100
<b>Figura 87.</b> Resultado de Análisis de frecuencia de 4 QAM.....	101
<b>Figura 88.</b> Constelación de la demodulación 4QAM.....	101
<b>Figura 89.</b> Técnica de Codificación para reducción de PAPR.....	102
<b>Figura 90.</b> Resultado de PAPR con BPSK.....	103
<b>Figura 91.</b> Resultado de PAPR con 16 QAM. ....	103
<b>Figura 92.</b> Resultado de PAPR con 64 QAM. ....	104
<b>Figura 93.</b> Registro IMSI en la red. ....	104
<b>Figura 94.</b> Llamada realizada en la red GSM. ....	105
<b>Figura 95.</b> Pantalla principal del interfaz. ....	106
<b>Figura 96.</b> Interfaz para desarrollo de prácticas. ....	107

## **RESUMEN**

Se han desarrollado un gran número de aplicaciones que funcionan utilizando comunicaciones inalámbricas, y en cada una de ellas se utiliza distintos hardware para la transmisión y recepción, como es el caso de las tecnologías Wi Fi y, LTE o Radio Difusión por citar algunas. Cada tecnología trabaja con distinto rango de frecuencias o modulaciones, por lo que es difícil contar con un dispositivo dedicado netamente a cada una de estas tecnologías en un salón de clases o laboratorio de investigación, por ello nace la necesidad de la integración de todas las aplicaciones sin tener que cambiar el hardware, a partir de esto se puede utilizar el concepto de SDR (Radio Definido por Software) el cual permite alterar el funcionamiento de hardware al emplear software con el objetivo de disminuir costos, partiendo de esta premisa el presente proyecto propone una serie de prácticas empleando esta tecnología con el fin de permitir que el estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones pueda conocer las aplicaciones y beneficios que tiene SDR, de la misma manera el docente puede hacer uso de estas prácticas para complementar el proceso de aprendizaje del estudiante.

La teoría impartida en los módulos de: Comunicaciones Analógicas, Comunicaciones Digitales, Comunicaciones Inalámbricas y Comunicaciones Móviles permite al estudiante establecer criterios teóricos para el manejo de cada parámetro que determina el funcionamiento de las prácticas desarrolladas en el presente trabajo.

**Palabras clave:** Radio Definido por Software, USRP, GNU Radio, UHD USRP, WX GUI, QT GUI.

## **ABSTRACT**

A large number of applications have been developed that work using wireless communications, and in each of them different hardware is used for transmission and reception, as is the case with Wi Fi and LTE or Radio Broadcast technologies, to name a few. Each technology works with a different range of frequencies or modulations, so it is difficult to have a device dedicated to each of these technologies in a classroom or research laboratory, therefore the need for the integration of all applications arises. Without having to change the hardware, from this the concept of SDR (Software Defined Radio) can be used, which allows altering the operation of hardware by using software with the aim of reducing costs, starting from this premise this project proposes a series of practices using this technology in order to allow the student of the Engineering Degree in Electronics and Communications to know the applications and benefits that SDR has, in the same way the teacher can make use of these practices to complement the process of student learning.

The theory taught in the modules of: Analog Communications, Digital Communications, Wireless Communications and Mobile Communications allows the student to establish theoretical criteria for the management of each parameter that determines the operation of the practices developed in this work.

**Key words:** Software Defined Radio, USRP, GNU Radio, UHD USRP, WX GUI, QT GUI.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Antecedentes Investigativos**

Las comunicaciones inalámbricas han ido evolucionando y con ello han surgido diversas tecnologías algunas de ellas incompatibles a la hora de reutilizar equipos o el uso de servicios, es así que nace la SDR para mejorar la interoperabilidad de servicios, estableciendo procedimientos y técnicas que realizan procesamiento de señales de radio por medio de dispositivos que pueden ser modificados mediante el uso de software para lograr un cambio eficiente entre tecnologías, sin representar un costo, dicho dispositivo es reconfigurable para que sea capaz de soportar diversas frecuencias, la primera implementación del concepto se realizó en el proyecto militar estadounidense SpeakEasy el cual comenzó en el año 1991 y culminó en el año 1995, cuyo objetivo fue implementar 10 tecnologías de comunicaciones inalámbricas, operando en la banda de frecuencias de 2MHz a 20MHz. Actualmente existe un grupo de trabajo denominado Wireless Innovation Forum, el cual está dedicado a desarrollar el campo de la SDR mediante especificación y estándares, para que pueda ser usado tanto para militares, civiles y comerciantes, los miembros de este foro tienen una amplia base en el desarrollo de plataformas de Radio Definido por Software (SDR), Cognitive Radio (CR) y Dynamic Spectrum Acces (DSA). [1]

David Angulo, en la ciudad de Bogotá propone un “DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO APLICANDO RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR”, el trabajo plantea implementar un sistema de telefonía móvil celular de segunda generación, la cual se efectuó con la herramienta SDR para GSM ( OpenBTS), la arquitectura de este sistema consta de Asterisk con el protocolo SIP que permite realizar la conmutación y gestión de llamadas a un usuario GSM, la estructura de OpenBTS consta de un terminal celular ( Mobile station), una interfaz de aire UM, encargado de la recepción (USRP N210), una tarjeta hija que se adhiere al USRP ( utilizada para que trabaje en la banda de frecuencia GSM ); para la recepción de señales con tecnología LTE (4 G) utiliza los bloques de procesamiento en GNU Radio, el primer bloque es usado para la sincronización y procesamiento y el segundo bloque describe el barrido de la señal, los bloques más influyentes son CP (Cyclic Prefix), PSS (Primary Synchronization Symbol), SSS(Second Synchronization Symbol), Channel Estimator, PBCH (Physical Broadcast Channel) demux resource blocks, Decode PBCH y Decode BCH (Broadcast Channel) y MIB (Master Information Block) unpack las pruebas efectuadas determinan que cada bloque en GNU Radio completa la sustracción de cabeceras y demás códigos que hacen parte de la señal pura transmitida por un eNodeB, además que la estación base permite efectuar envío y recepción de llamadas y mensajes. [2]

En el trabajo titulado “DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PRUEBAS DE UN RADAR MONOESTÁTICO UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE”, Francisco Vera y Andrea Mora , en la ciudad de Quito desarrollan un radar de tipo de onda continua, empleando los NI-USRP 2920 y antenas, debido a las potencialidades de este, además en la parte de software emplearon librerías de LabView, dando como resultado el prototipo de prueba para distancia máxima de 2.7 m, frecuencia Doppler de 1.8499 GHz, velocidad de 1.16954 m/s, y densidad de potencia para la selección de la antena Patch para interiores estas pruebas fueron efectuadas en el laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. [3]

Juan Morales y Angie Triviño en su trabajo denominado “DESARROLLO DE GUÍAS DE LABORATORIO APLICANDO RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN HANDOVER CON ESTACIONES BASE DE SEGUNDA GENERACIÓN Y LA PRIMERA FASE DE UNA ESTACIÓN BASE DE CUARTA GENERACIÓN”, en la ciudad de Bogotá realiza la implementación del handover entre estaciones se hace uso de la herramienta OpenBTS la cual permite crear una estación base, la misma consta de dos estaciones cada una conectada a una USRP N210 con distintas direcciones IP, estas su vez están conectadas a un tercer servidor en el que se encuentran los servicios de Asterisk, SIPAuthServe y Smqueme para poder visualizar la información de las estaciones utilizó el aplicativo G-Net Track Lite, donde al enviarse mensajes de texto entre bases se verificó el funcionamiento, los resultados analizados de los paquetes indican el momento de registro del usuario en la base central y la conexión a la BTS más cercana; en la estación base de cuarta generación se utilizó la herramienta OpenLTE, la cual presenta incompatibilidades con la USRPN210 porque frecuencia de muestreo pues esta es más pequeña para que funcione con OpenLTE, por lo concluyen que se necesita la USRP B210 que presenta mayor robustez. [4]

Syed Muhammad Hashir en la conferencia desarrollada por Advances in Wireless and Optical Comunications, expuso su trabajo denominado " PSK MODULATION/DEMODULATION AND PERFORMANCE EVALUATION IN FM BAND USING USRP ", en el cual presenta un sistema de comunicación basado en USRP, que implementa modulación y demodulación PSK, este sistema transmite la señal modulada PSK en la banda FM con una frecuencia central de 86 MHz, además se compara el rendimiento del ancho de banda y la tasa de errores de bits (BER) para dos tipos distintos tipos de modulación PSK basadas en múltiples técnicas de modelado de pulsos, para lo cual se emplea una USRP B210, el software LabView de National Instruments para la aplicación de los controladores UHD, en los cuales se puede observar los diagramas de ojo y las constelaciones de la modulación, en los resultados se mostró que QPSK tiene mayor rendimiento de la tasa de datos que BPSK, y que al emplear la técnica de conformación de impulsos de

la señal produce poca interferencia intersímbolos y un mejor rendimiento de tasa de errores de bits (BER). [5]

En el trabajo titulado “APLICACIÓN DE UN SISTEMA SDR (RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE) PARA PRÁCTICAS MULTIDISCIPLINARIAS EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD ISRAEL” desarrollado por Byron Lisintuña en la ciudad de Quito utiliza un RTL-SDR 2832U como un sintonizador de frecuencias, la señal que ingresa a la antena fue procesada utilizando el software Matlab- Simulink, con el cual efectuó tres simulaciones, la primera fue una introducción para el usuario identificando los componentes de un sistema SDR, en la segunda se efectuó un sintonizador GSM, FM, TV DIGITAL, y en la tercera aplicación efectuó un receptor FM empleando las herramientas de Simulink mostrando los resultados del canal de frecuencia usado, potencia predeterminada, frecuencia central predeterminada, entre otros aspectos técnicos . [6]

Álvaro Monteros en la ciudad de Quito propone el “DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA LA MATERIA DE FUNDAMENTOS DE COMUNICACIONES USANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE”, el trabajo hace uso de la tecnología de Radio Definida por Software (SDR) empleando el software GNU Radio el mismo que es de fácil manejo y que no necesita licencia al ser desarrollado en plataforma abierta, desarrollo 14 prácticas de laboratorio las cuales son relacionadas con la materia de Fundamentos de Comunicaciones en las mismas se describe como realizar el análisispectral de una señal, uso de filtros, modulaciones y demodulaciones analógicas, así como un proyecto final, el hardware empleado para el desarrollo de cada práctica es un USRP 2920 el cual presento las características necesarias para realizar diversas aplicaciones. [7]

## **1.2. Contextualización del problema**

El avance de las telecomunicaciones ha permitido desarrollar diversas aplicaciones como: radio difusión, telefonía móvil, radio cognitiva, enlaces satelitales, entre otras.

Con el progreso de estas nacen las incompatibilidades entre los servicios, es así que en a partir de 1990 nace el concepto de Radio Definido por Software (SDR) plasmada por Joseph Mitola [8], la cual es utilizada en aplicaciones militares como académicas, ya que permite modificar el hardware al hacer uso de un software dando hincapié al desarrollo de proyectos investigativos y prácticos, áreas en la que las autoridades como la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENECYT, han realizado una gran inversión, ya que según datos del Ministerio de Finanzas el monto destinado para la Universidad Técnica de Ambato fue de \$17,229,101.57 [9], el mismo que fue empleado en proyectos de investigación, programas de formación del talento humano y adquisición de equipamiento e infraestructura.

La Facultad de Ingeniería de Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato en los últimos años ha realizado una gran inversión para el equipamiento de laboratorios de las distintas carreras. La Carrera de Electrónica y Comunicaciones ha recibido una inversión de 50.000 dólares destinados a la compra de dispositivos USRP con accesorios, para el equipamiento del laboratorio de Comunicaciones con los cuales se puede desarrollar distintas prácticas de los módulos relacionadas con los temas de Comunicaciones impartidas en la Carrera de Electrónica y Comunicaciones, y programadas para la Carrera de Telecomunicaciones, sin embargo desde la fecha de adquisición los equipos no son utilizados por causas como: la poca información existente en la facultad del uso de los mismos, la capacitación básica, desconocimiento de la existencia de los equipos, falta de prácticas aplicadas a las materias del área de comunicaciones, entre otras. Por lo cual los recursos invertidos no han sido explotados de una manera eficiente. [9], [10]

Es necesario que el estudiante aproveche al máximo la capacidad de los equipos de radio definido por software que se encuentran disponibles en el laboratorio, mediante la inclusión de prácticas que combinen la enseñanza tradicional de las asignaturas con aspectos prácticos de las comunicaciones, permitiendo incentivar la investigación y potencialización de futuras aplicaciones de estos equipos al tener una gran capacidad de desarrollo en el espectro radio eléctrico, dando así aplicaciones

como: modulaciones analógicas y digitales, radiodifusión, GPS, telefonía móvil, radares, entre otras [11]. A la vez el docente puede interactuar con el estudiante con aplicaciones que se presentan en la vida profesional dando un panorama de la situación actual de las comunicaciones y dejando precedentes para desarrollar investigaciones de sistemas más complejos tanto en pregrado como en posgrado.

Al contar los dispositivos USRP N210 con tecnología de Radio Definido por Software (SDR) no se emplea hardware adicional que represente una inversión económica para el estudiante o para la facultad, además el software usado en estos dispositivos no requiere de licencias por lo que el mismo puede ser configurado de diferente manera para alterar su hardware y adaptarse desde un modulador AM y FM, hasta una estación base GSM, brindando un punto de partida para aplicaciones a gran escala que permitan mejorar el nivel de investigación de la facultad aplicando los contenidos adquiridos en las asignaturas afines a comunicaciones. [12], [13]

### **1.3. Fundamentación teórica**

#### **Radio Definido por Software (SDR)**

El pionero en introducir el concepto Radio Definido por Software (SDR) es Joseph Mitola en el año 1991 para referirse a “radios reconfigurables”, empleando una sola plataforma de hardware denominado radio, el cual se emplea para transmitir y receptar la señales, fue así que nació este concepto, dando paso al desarrollo de diversas aplicaciones tanto en los aspectos civiles y militares, ya que las tarjetas de radio están inmersas en diversos dispositivos como teléfonos celulares, computadores, equipos de sonido, entre otros.

Actualmente SDR se utiliza para investigaciones y desarrollo de aplicaciones por lo que existe una organización que desarrolla este tipo de concepto denominada WIRELESS INNOVATION FORUM la cual define a la SDR como: “Radio en las que algunas o todas las funciones de la capa física se definen por software” [1] bajo

Este concepto, la tecnología SDR, trabaja en las capas inferiores del modelo OSI, específicamente en la capa física y la capa de enlace ya que tiene el control de algunas funciones que habitualmente de esto se encarga la electrónica analógica.

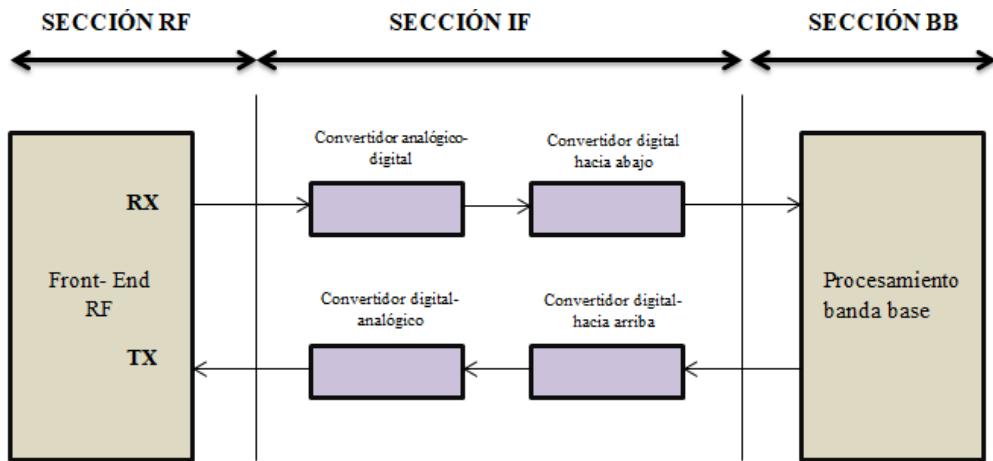
Es importante mencionar los aspectos básicos que forman parte de un sistema SDR, cuáles son y qué funciones cumplen. Un sistema SDR consta de cuatro aspectos principales, los cuales son detallados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Aspectos principales de un sistema SDR. [16]

ASPECTO	FUNCIÓN
<b>HARDWARE</b>	Conjunto de dispositivos y componentes que forma el conjunto de radio.
<b>SOFTWARE</b>	Conjunto de servicios e interfaces a través de las cuales las aplicaciones interactúan con el hardware.
<b>APLICACIONES Y SERVICIOS</b>	Define la aplicación y capa de servicio.
<b>USUARIO</b>	Control de la aplicación y transferencia de datos.

### **Esquema Genérico de SDR**

Desde su aparición la SDR, ha ido evolucionando tanto en su concepto y arquitectura. Sin embargo, su desarrollo se ha dado a partir de un esquema básico, el mismo está compuesto por tres bloques: sección RF, sección de IF y la sección banda base, como se muestra en la figura 1. [14]



**Figura 1.** Arquitectura Básica de un SDR. [15]

Es importante detallar dos conceptos que forman parte de la arquitectura como es: Front end es el segmento que engloba conceptos de radio frecuencia para transmitir y recibir señal; el otro concepto es el back end el cual es un segmento que contiene la funcionalidad del procesamiento de la señal y contiene también secciones IF. [14]

A continuación, en la tabla 2 se describe los bloques que se presentan en la arquitectura básica de un SDR

**Tabla 2.** Bloques de una arquitectura básica SDR. [16]

BLOQUES	DESCRIPCIÓN
<b>SECCIÓN RF</b>	Transmite o recibe la señal de radio frecuencia a través de la antena, acoplando y realizando una conversión descendente a una señal IF esto en la recepción y en la transmisión realiza una conversión ascendente de señal IF a RF.
<b>SECCIÓN IF</b>	En la recepción pasa la señal IF a banda base y la digitalizarla y en la transmisión convierte la señal banda base a una señal IF realizando la conversión digital -analógica.
<b>SECCIÓN BANDA BASE</b>	Realiza operaciones como: salto de frecuencia, configuración de la conexión, ecualización, recuperación de sincronismo, entre otras.

## Arquitectura de un Sistema SDR

A partir del esquema genérico anteriormente descrito se puede abordar una arquitectura de un sistema SDR, el mismo que está formado un subsistema analógico y un subsistema digital, como se muestra en la figura 2. [17]

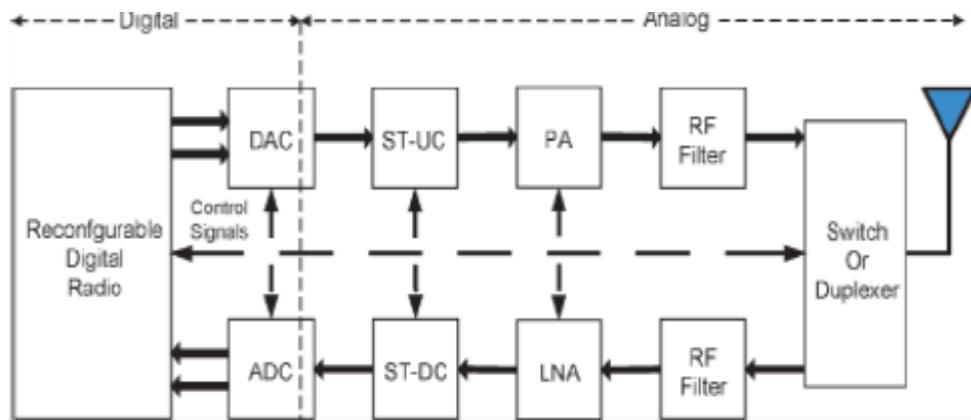


Figura 2. Arquitectura de un sistema SDR ideal. [18]

1) **Subsistema analógico:** El subsistema analógico comprende funciones como: filtrado de RF, combinación de RF, pre- amplificación, amplificación de potencia y generación de frecuencia de referencia. Está compuesta por los siguientes elementos: [18]

- Antena
- Circulador
- RF PA (Amplificador de potencia de radiofrecuencia)
- LNA (Amplificador de bajo ruido)
- DAC (Conversor Digital -Análogo)
- ADC (Conversor Análogo- Digital)

## Características de SDR

La gran capacidad de esta tecnología permite implementar cualquier sistema de comunicaciones, las características de SDR se pueden ver desde el punto de los beneficiarios de esta los cuales son los fabricantes, proveedores y usuarios finales, a continuación se detallan los mismos. [19]

### **Usuarios finales:**

Las ventajas que ofrece a los usuarios finales como estudiantes, investigadores, profesores, militares, entre otros son:

- Interoperabilidad, es decir, cambiar las funciones del equipo sin tener que cambiar o añadir hardware.
- Control de funciones de un dispositivo de comunicaciones.
- Costo reducido en comparación con equipos dedicados para funciones específicas.

### **Fabricantes:**

Las ventajas que ofrece este tipo de tecnología desde el punto del fabricante Ettus Research son:

- Reprogramación remota, corrige fallos mediante software de un equipo de radio, reduciendo costos en operación y mantenimiento.
- Introducción rápida al mercado ya que posee una estructura común.
- Reutilización de software en equipos de radio reduciendo los costos de desarrollo.

### **Proveedores:**

Desde el punto de los proveedores como la National Instruments o Ettus Research las ventajas que ofrece SDR son las siguientes:

- Se añaden nuevas capacidades y características a la infraestructura existente sin necesidad de aumentar costos.
- Uso de una plataforma de radio común para múltiples mercados, lo cual reduce el apoyo logístico y los gastos operativos.
- Descargas remotas de software, las cuales pueden aumentar la capacidad.

## **Hardware para SDR**

Existen diversos dispositivos en el mercado los cuales son:

**HackRF One:** Es una plataforma de hardware de código abierto capaz de la transmisión y recepción de señales de radio de 1MHz a 6GHz, que se conecta a la computadora mediante USB. [20]

**RTL-SDR:** Este hardware maneja un rango de frecuencias de 500KHz a 1.75GHz, es un dispositivo USG que se conecta a la computadora y funciona como un escáner de radio. [21]

**AirSpy:** Es el hardware de radio definido por software (SDR) más popular su rango de operación es de 24MHz a 1.8 GHz, puede conectarse a una computadora por medio del puerto USB o a una Raspberry. [22]

**Uberooth One:** El dispositivo opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz usada para la experimentación de Bluetooth, por lo cual monitorea el tráfico real de Bluetooth y su ventaja es que la configuración se lo puede realizar mediante código abierto. [23]

**USRP:** Es un dispositivo transceptor periférico de radio por software universal, empleado para prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica, tiene rangos de frecuencias de hasta 6 GHz con hasta una ancho de banda instantáneo de 56MHz, es compatible con los siguientes software como LabVIEW, Matlab,GNU Radio. [24]

Fue desarrollado con fines educativos e investigativos, actualmente existen dos versiones de USRP-1 y USRP-2.

En el USRP-1 la conectividad es a través del puerto USB, son poco usados y en la actualidad ya no se encuentran disponibles. [25]

El USRP-2 utiliza el puerto Gigabit Ethernet para la conectividad, en la actualidad es el más usado, por sus características como: [26]

- De 40MHz - 50 MHz de ancho de banda de RF con muestras de 8 bits.
- De 20MHz - 25 MHz de ancho de banda de RF con muestras de 16 bits.

- Convertidor análogo – digital (ADC) de 14 bits 100MS/s.
- Convertidos digital – análogo (DAC) de 16 bits 400MS/s.
- Sincronización a una señal externa de reloj de 5 a 10 MHz.
- Capacidad MIMO.

La Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial dispone en el Laboratorio de Comunicaciones el equipo USRP-N210 el mismo que será empleado para las diversas aplicaciones de prácticas de laboratorio, por lo que es necesario describir las características de este.

### **Dispositivo USRP N210**

Es una versión mejorada del USRP N200 por que incluye un FPGA más grande, fue diseñado para aplicaciones de comunicaciones exigentes que requieren este tipo de desarrollo rápido, este dispositivo permite diversas aplicaciones de radiocomunicaciones tales como radio difusión, televisión analógica y digital, redes móviles, entre otras [27] . En la figura 3 se visualiza el dispositivo que se encuentra en el Laboratorio de Comunicaciones de la Facultad.



**Figura 3.** USRP N210. [27]

A continuación, en la tabla 3 se describe las características técnicas del dispositivo:

**Tabla 3.** Características técnicas del USRP N210. [27]

CARACTERÍSTICAS	USRP N210
<b>INTERFAZ</b>	Gigabit Ethernet
<b>RANGO DE FRECUENCIA RF</b>	10MHz a 6GHz
<b>ANCHO DE BANDA</b>	25 MHz (16 bits por muestra) 50 MHz (8 bits por muestra)
<b>CONVERTIDOR ANÁLOGO – DIGITAL</b>	2 canales, 100 MS/s 14-bits
<b>CONVERTIDOR DIGITAL – ANÁLOGO</b>	2 canales, 400 MS/s 16-bits
<b>DUPLEXACIÓN</b>	Full
<b>MÁXIMA VELOCIDAD</b>	25 MHz (16 bits por muestra) 50 MHz (8 bits por muestra)
<b>NÚMERO DE CANALES DE SALIDA</b>	2
<b>NÚMERO DE CANALES DE ENTRADA</b>	2
<b>LATENCIA</b>	Ms
<b>PROCESAMIENTO</b>	FPGA/host
<b>SOFTWARE COMPATIBLE</b>	LabVIEW GNU Radio Matlab
<b>COMPATIBILIDAD DEL SISTEMA OPERATIVO</b>	Windows Linux Mac OS X

En la figura 4 se muestra el panel frontal del USRP N210, el cual consta de los siguientes conectores y leds indicadores descritos en la tabla 4 y 5 respectivamente.



**Figura 4.** Panel frontal del USRP N210. [28]

**Tabla 4.**Conectores del panel frontal del USRP N210. [28]

CONECTOR	DESCRIPCIÓN
<b>REF IN</b>	Entrada de señal de referencia para oscilador local; señal máxima de 10 MHZ con potencias de 0 dBm hasta 15 dBm.
<b>PPS IN</b>	Entrada de referencia de temporización de pulso.
<b>RX1</b>	Transmisor de señales de radio frecuencia, tiene un conector SMA (hembra) con una impedancia de $50 \Omega$ .
<b>RX2</b>	Receptor de señales de radio frecuencia, tiene un conector SMA (hembra) con una impedancia de $50 \Omega$ .
<b>MIMO EXPANSION</b>	Ranura de expansión mimo empleado para realizar la conexión de USRP en paralelo.
<b>GB ETHERNET</b>	Puerto Gigabit Ethernet permite la comunicación con la PC.
<b>POWER</b>	Entrada de la alimentación del dispositivo, trabaja con 6 voltios y 1.3 amperios

**Tabla 5.**Leds indicadores del USRP N210. [28]

LED	DESCRIPCIÓN
<b>A</b>	Indica si el equipo está transmitiendo
<b>B</b>	Indica si el cable MIMO está conectado
<b>C</b>	Indica si el equipo está recibiendo
<b>D</b>	Indica si firmware del equipo está cargado
<b>E</b>	Indica la referencia del oscilador del local del dispositivo.
<b>F</b>	Indica el estado de funcionamiento del equipo.

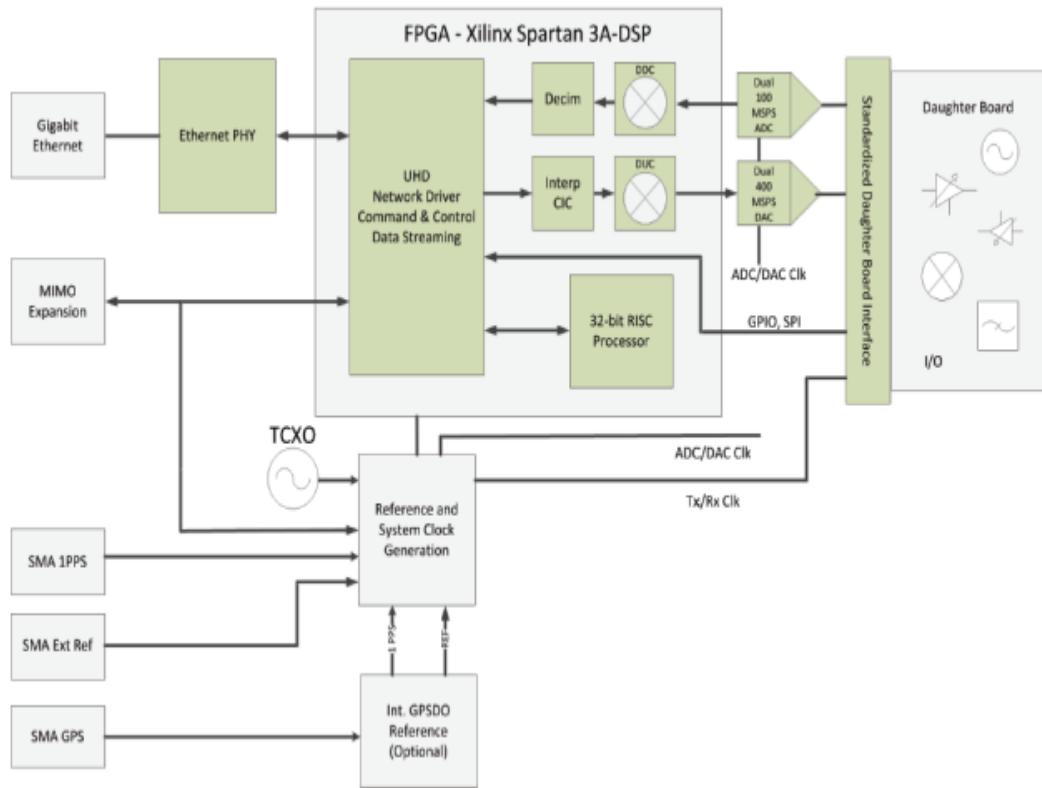
## Arquitectura del USRP N210

En la figura 5 se muestra la arquitectura del dispositivo USRP el mismo que consta de dos PGA (Programable Gain Amplifier) el cual es usado para amplificar la señal de entrada con el fin de utilizar el rango completo de la señal, FPGA ( Fiel Programable Gate Array ) perteneciente a la familia Xilinx Spartan 3A-DSP 3400

FPGA el mismo que se conecta al puerto Gigabit Ethernet para el interfaz con la PC con un ancho de banda de 50 MHz empleando una cuantización de 8 bits, la función de este componente es efectuar operaciones matemáticas de alto ancho de banda y reducir la tasa de datos para que se pueda establecer la comunicación hasta el PC. [29]

Para la transmisión se tiene dos DACs (Digital Analog Converter) de alta velocidad a 16 bits por muestra y una tasa de 400 millones de muestras por segundo, que en conjunto con un PGA proporciona una ganancia de hasta 10 mW. [29]

Para la recepción se tiene dos ADCs (Analog Digital Converter) de alta velocidad a 14 bits por muestra y una tasa de 100 millones de muestras por segundo. Las salidas de estas van conectadas a las entradas de los DACs, para mezclar, filtrar y diezmar las señales a la entrada de la FPGA. [29]



**Figura 5.** Arquitectura de hardware USRP N210. [28]

## Software para SDR

En la actualidad existen algunos software empleados con esta tecnología entre los cuales se tiene: Matlab, para su uso con SDR se deben descargar paquetes para trabajar con el hardware; LabVIEW, cuenta con paquetes para comunicaciones que se integran con el hardware de SDR; GNU Radio, que posee paquetes de código abierto y software libre que permiten el desarrollo de aplicaciones. Por las características presentadas se optó por emplear GNU Radio siendo un software libre, basado en Phyton y compatible con los siguientes sistemas operativos Windows, Linux, Mac OS. [30]

## GNU RADIO

GNU Radio es un software de código abierto para aplicaciones SDR, proporciona una gran cantidad de procesamiento de señales, interfaz gráfica de usuario y bibliotecas de utilidades. Cada aplicación que se desarrolla se construye a partir de bloques que son conectados por puertos, cada uno de ellos realiza algún aspecto del procesamiento de la señal. [30]

La interfaz del software presenta en los siguientes elementos:

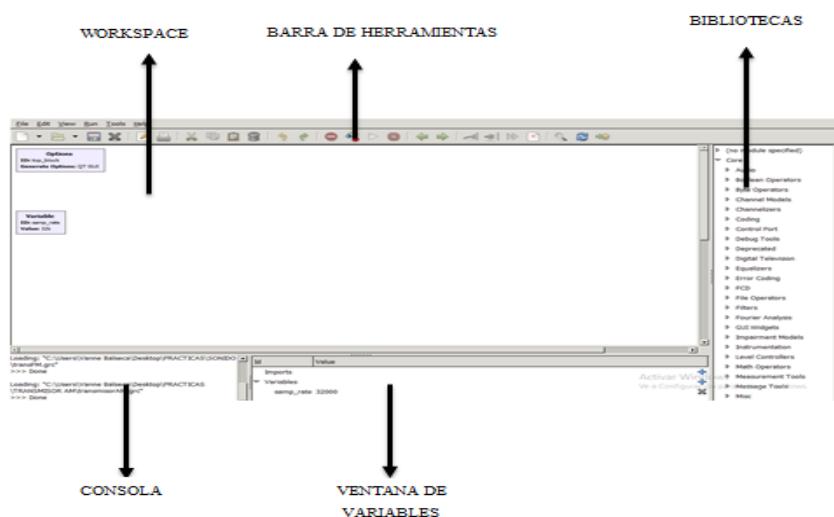


Figura 6. Interfaz de GNU Radio. [31]

**Workspace:** Es el lugar de trabajo donde se colocan los bloques para el desarrollo de aplicaciones como fuentes, sumideros, moduladores, demoduladores entre otros.

**Barra de herramientas:** La barra presenta diversas opciones a utilizar como editar, guardar, ejecutar, copiar, cortar, además muestra cuando el programa no puede ser ejecutado por algún error en la compilación.

**Bibliotecas:** En las bibliotecas se encuentran las diversas librerías como moduladores analógicos y digitales, tipos de datos, fuentes, sumideros, codificadores, entre otros, todos estos bloques son propios de GNU Radio que pueden ser usados para las aplicaciones.

**Consola:** En esta parte de la pantalla se visualiza la ejecución del proceso de envío por medio de mensajes, además proporciona información de algún error en la ejecución de algún programa.

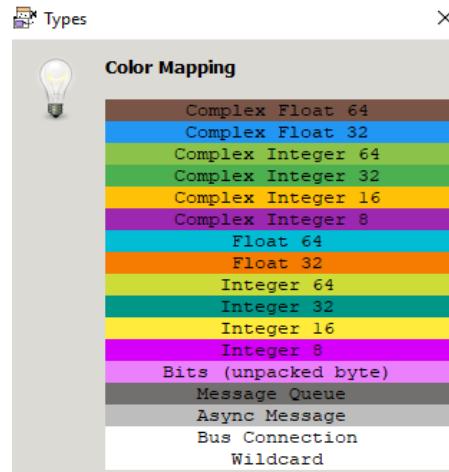
**Ventana de variables:** Permite visualizar las variables que se están utilizando, además permite la creación de nuevas variables.

### Tipos de Variables

Dependiendo de la aplicación que se vaya a desarrollar en GNU Radio se puede manejar los siguientes tipos de variables:

- Int: datos de tipo entero formado por 4 bytes.
- Float: datos de tipo flotante formado por 4 bytes.
- Complex: datos de tipo complejo formados por una parte de real y otra parte imaginaria integrados por 8 bytes.
- Byte: datos formados por 1 byte
- Short: Datos de tipo entero formados por 2 bytes.

Para encontrar los tipos de variables en GNU Radio se debe buscar en la barra de menú sobre la opción Help y Types en el cual se despliegan todos los datos antes mencionados, en la figura 7 se indica los tipos de variables relacionados con los colores que maneja GNU Radio.



**Figura 7.** Tipos de variables GNU Radio. [31]

Para el análisis de las señales tanto transmitidas como enviadas existen dos herramientas WX GUI y QT GUI las cuales permiten ver el comportamiento de la señal y poderlos interpretar dependiendo de la aplicación que se ejecute. A continuación, en las tablas 6 y 7 se detallan las herramientas que posee cada una. [31]

**Tabla 6.** Herramientas de QT GUI. [31]

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
<b>QT GUI FREQUENCY SINK</b>	Permite variar el número de muestras FFT, para visualizar con mayor o menor precisión la gráfica.
<b>QT GUI CONSTELLATION SINK</b>	Permite observar las constelaciones de una señal modulada digitalmente.
<b>QT GUI HISTORY SINK</b>	Permite visualizar un histograma, además se puede agregar más entradas para comparar señales.
<b>QT GUI TIME SINK</b>	Permite ver el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo.
<b>QT GUI SINK</b>	Permite observar las 4 herramientas en una sola ventana con diversas pestañas de interfaz.
<b>QT GUI WATERFALL SINK</b>	Permite visualizar una gráfica similar a la de un mapa de calor en donde se puede analizar las frecuencias en las que existe mayor concentración de estas.

**Tabla 7.** Herramientas de WX GUI. [31]

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
<b>WX GUI FFT SINK</b>	Permite observar el comportamiento de las señales en el dominio de la frecuencia.
<b>WX GUI SCOPE SINK</b>	Permite visualizar el comportamiento de las señales en el dominio del tiempo.
<b>WX GUI CONSTELLATION SINK</b>	Permite ver las constelaciones de las señales digitales moduladas.
<b>WX GUI HISTO SINK</b>	Permite observar un histograma.
<b>WX GUI NUMBER</b>	Permite entregar en tiempo real el valor numérico de la señal.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo General

Implementar prácticas multidisciplinarias en el área de Comunicaciones empleando SDR para la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la estructura y formas de configuración un dispositivo SDR para un sistema de comunicación.
- Elaborar una serie de prácticas empleando tecnología SDR con los USRP para diversas asignaturas.
- Documentar las prácticas desarrolladas en guías que faciliten el aprendizaje de los estudiantes.

### 1.4.3. Descripción de los objetivos

El objetivo principal del presente proyecto de investigación consiste en implementar prácticas multidisciplinarias en el área de Comunicaciones para que los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones puedan llevar de la mano la teoría con la práctica, además de desarrollar su potencial en el ámbito académico e investigativo empleando SDR (Radio Definido por Software).

Para el desarrollo de este objetivo fue necesario realizar las siguientes actividades:

- Investigar sobre el funcionamiento del hardware que utiliza SDR.
- Determinar el software que se puede usar con SDR.
- Establecer comunicación entre el hardware y software de SDR.
- Revisar los temas que se imparten en las materias de comunicaciones.
- Enlistar las prácticas que se van a desarrollar.
- Desarrollar las prácticas y comprobar el funcionamiento de cada una de ellas.
- Documentar el procedimiento para cada una de las prácticas.

Analizar la estructura y formas de configuración un dispositivo SDR para un sistema de comunicación permitió conocer el funcionamiento del hardware de SDR, así como establecer la configuración entre hardware y software.

Las actividades que permitieron el cumplimiento de este objetivo fueron:

- Determinar los principales hardware que utiliza SDR.
- Establecer las características de cada hardware utilizado para SDR.
- Analizar la disponibilidad de equipos SDR dentro de la Facultad.
- Investigar sobre el funcionamiento del equipo a utilizarse en las prácticas.
- Analizar los software compatibles con SDR.
- Determinar el software que mejor se acople a las necesidades de las prácticas.
- Analizar las formas de comunicación entre el hardware y software de SDR.

Elaborar una serie de prácticas empleando tecnología SDR con los USRP para diversas asignaturas, permitió desarrollar diversas aplicaciones que son de utilidad para una mejor comprensión de temas tratados durante los módulos de comunicaciones.

Para el cumplimiento de este objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

- Revisar los temarios de las materias relacionadas con el área de Comunicaciones.
- Efectuar una lista de las prácticas que se van a desarrollar.
- Desarrollar cada práctica referente a un tema relacionado al área de comunicaciones.
- Efectuar pruebas y verificar el correcto funcionamiento de cada práctica.

Otro objetivo del presente proyecto fue documentar las prácticas desarrolladas en guías que faciliten el aprendizaje de los estudiantes, mediante una interfaz lo cual permite tener más interacción con el estudiante.

Para la consecución del objetivo se llevó a cabo las siguientes actividades:

- Recopilar información sobre las temáticas de las prácticas desarrolladas.
- Analizar los lenguajes de programación que se usan en el desarrollo de interfaces.
- Determinar el lenguaje de programación que se ajusta a las necesidades del proyecto para el desarrollo de la interfaz.
- Diseñar una interfaz que despliegue toda la información de lo desarrollado.

## CAPÍTULO II

# METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales

Para el desarrollo del presente proyecto se empleó los siguientes materiales:

#### 2.1.1. Hardware:

**USRP (Dispositivo de Radio Definido por Software):** Es una familia de Hardware utilizada en aplicaciones SDR desarrollada por Matt Ettus, crea una conexión entre las frecuencias de radio y la PC, está compuesta por una placa base con FPGA de procesamiento de señal de alta velocidad, placas secundarias que cubren distintos rangos de frecuencia y una antena. [32] En la tabla 8 se indica las características de diversos USRP disponibles en el mercado.

**Tabla 8.** Características Técnicas de diversos modelos de USRP. [33], [34]

CARACTERISTICAS	DISPOSITIVO		
	USRPN210	URSPB210	USRPN2920
RANGO DE FRECUENCIAS RF	10 MHz a 6GHz	70 MHz a 6GHz	50MHz a 2.2 GHz
CONEXIÓN	Gigabit Ethernet	USB	Gigabit Ethernet

DUPLEXACIÓN	Full Duplex	Full Duplex	Full Duplex
<b>DAC</b>	2 canales, 16 bits	12 bits	2 canales, 16 bits
<b>ADC</b>	2 canales, 14 bits	12 bits	2 canales, 14 bits
<b>SISTEMAS OPERATIVOS</b>	Linux Windows Mac OS X	Linux Windows Mac OS X	Linux Windows Mac OS X
<b>PROCESAMIENTO</b>	FPGA/HOST	HOST	HOST

El laboratorio de Comunicaciones de la Facultad cuenta con el USRP N210 y cable Gigabit Ethernet, al compararlo con otros dos dispositivos tiene un rango de frecuencias más amplio que va de 10 MHz a 6 GHz debido a esto las aplicaciones que se pueden desarrollar son mucho más amplias, puesto que es compatible con diversos sistemas operativos, el procesamiento en este dispositivo es mejor dado que se efectúa tanto en el host como en la FPGA, la resolución DAC y ADC cuenta con 2 canales de 16 bit y 14 bits respectivamente, además al utilizar la interfaz Gigabit Ethernet la transmisión es más rápida en comparación con la USB. Por las características expuestas se decidió utilizar este dispositivo, para más detalles técnicos ver ANEXO A.

**Antenas Vert:** Antena onmidireccional que permite irradiar ondas electromagnéticas tanto para la recepción como transmisión de estas, cuenta con un gran ancho de banda, tiene pocos puntos de resonancia [36], a continuación, en la tabla 9 se muestra la tabla comparativa para elección de la antena a usar.

**Tabla 9.** Características Técnicas de Antenas VERT. [36], [37]

ESPECIFICACIONES	ANTENA	
<b>MODELO</b>	VERT 2450	VERT 900
<b>FABRICANTE</b>	Ettus	Ettus
<b>FRECUENCIA</b>	2.4 a 2.48 GHz 4.9 a 5.9 GHz	824 a 960 MHz 1710 a 1990 MHz
<b>GANANCIA</b>	3dBi	3dBi
<b>TIPO</b>	Omnidireccional	Omnidireccional

En vista a que las aplicaciones desarrolladas se llevan a cabo en bandas de frecuencias comprendidas desde 824 a 1990 MHz se optó por utilizar la Antena VERT 900, más características técnicas ANEXO B.

### **2.1.2. Software:**

Existen diversos software que permiten trabajar con SDR a continuación en la tabla 10 se expone los más óptimos para el desarrollo del proyecto:

**Tabla 10.** Características de software para SDR. [38], [39]

CARACTERÍSTICAS	SOFTWARE		
	MATLAB	LABVIEW	GNU RADIO
<b>ENTORNO</b>	Gráfico/ script	Gráfico	Gráfico
<b>DRIVER</b>	SR4all	NI USRP	UHD USRP
<b>RECURSO DE LA PC</b>	Alto	Medio	Medio
<b>LICENCIA</b>	Pagada	Pagada	Libre
<b>COMPLEJIDAD</b>	Alta	Alta	Media
<b>CAPACIDAD DE SIMULACIÓN</b>	No	No	Si
<b>SISTEMAS OPERATIVOS</b>	Windows Linux Mac OS	Windows Mac OS	Windows Linux Mac OS

En vista de las características presentadas por los software más empleados para desarrollo de sistemas SDR, se optó por utilizar GNU Radio porque se adapta a los requerimientos del proyecto al ser un software interactivo en el cual la programación se lo efectúa mediante bloques de todo tipo ya que van desde fuentes emisoras de datos hasta complejos bloques de corrección de errores, entre otros. Al ser compatible con diversos sistemas operativos existe una infinidad de información para el desarrollo de aplicaciones, permite la simulación de un sistema SDR a diferencia de Matlab y LabView los cuales siempre deben tener conectado el hardware para comprobar el funcionamiento de la aplicación.

### 2.1.1. Software para la interfaz de visualización de prácticas:

Con el fin de crear la interacción entre el usuario y las prácticas desarrolladas se optó documentarlo en una interfaz para lo cual se tomó los siguientes criterios presentados en la tabla 11 a continuación:

**Tabla 11.** Principales lenguajes de programación. [40]

ESPECIFICACIÓN	C++	JAVA	PHYTON
<b>PROCESO DE COMPILACIÓN</b>	Lenguaje compilado	Lenguaje compilado	Lenguaje interpretado
<b>LONGITUD DE CÓDIGO</b>	Líneas de código de 1.5 menor que JAVA	Líneas de código más extensas	Líneas de código de 3 a 5 menor que JAVA
<b>SINTAXIS</b>	Define bloques particulares por llaves, fin de declaraciones por punto y coma	Define bloques particulares por llaves, fin de declaraciones por punto y coma	Usa Sangría
<b>PLATAFORMA</b>	Dependiente	Independiente	Independiente
<b>HERENCIA MULTIPLE</b>	Simple y Múltiple	Múltiple parcial usando interfaces	Simple y Múltiple

Debido a las características presentadas, se decide trabajar con el lenguaje de programación Python ya que el mismo presenta mayor versatilidad en comparación con los otros lenguajes de programación expuestos en la tabla 11.

## **2.2. Métodos**

### **2.2.1. Modalidad de la Investigación**

#### **Investigación Aplicada**

El presente proyecto utilizó investigación aplicada ya que el problema se trató de manera práctica y se llevó a cabo con equipos que trabajen con tecnología SDR disponibles en el laboratorio de Comunicaciones de la FISEI.

#### **Investigación Bibliográfica**

Se utilizó investigación bibliográfica para la recolección de información científica relacionada con el tema propuesto, las consultas se realizaron en bases de datos de revistas científicas, libros electrónicos, publicaciones y artículos de páginas web relacionadas directamente con el tema de interés. La consulta en fuentes fiables es el proceso más adecuado para obtener información.

#### **Investigación Experimental**

También se llevó a cabo investigación experimental puesto que se desarrolló prácticas de interés para el estudiante como para el docente con el fin de consolidar los conocimientos, se expuso las diversas aplicaciones que se pueden efectuar sin necesidad de emplear un gran recurso de hardware.

### **2.2.2. Recolección de la Información**

Para el presente proyecto se recopiló información de libros, Internet, revistas científicas, trabajos de investigación, patentes, papers, guía del tutor para el desarrollo del proyecto. Además, se obtuvo información de los docentes del área de Comunicaciones.

### **2.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos**

Luego de la recolección de información requerida para el desarrollo del presente trabajo, se efectuaron los siguientes procesos:

- Análisis y clasificación de información relevante al tema.
- Verificación de los fundamentos teóricos con aplicaciones prácticas, mediante el análisis de señales y valores obtenidos.
- Se presenta los resultados de las prácticas efectuadas mediante un interfaz.

### **2.2.4. Desarrollo del proyecto**

Para el diseño y aplicación de sistemas de comunicación empleando SDR para prácticas multidisciplinarias dentro de la presente investigación se abordó los siguientes puntos:

- Descripción de las características típicas de la tecnología SDR.
- Análisis del funcionamiento del equipo de radio definido por software USRP N210.
- Análisis del software compatible con la USRP N210.
- Revisión de los temas tratados en los diversos módulos de comunicaciones para determinar las prácticas a desarrollarse en cada una.
- Clasificación de aplicaciones a desarrollarse con los USRP en cada uno de los módulos.
- Desarrollo de prácticas a efectuarse en cada módulo.
- Verificación del funcionamiento de las prácticas a desarrollarse.
- Elaboración de un manual de prácticas con los USRP N210.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Análisis y discusión de los resultados**

La Malla Curricular de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones consta de 65 materias con un total 227 créditos en los mismos se manejan ejes humanistas con 18 créditos, básicos con 79 créditos, profesionales con 118 créditos y optativos con 12 créditos, para el desarrollo de este tema de investigación se optó por centrarse en el eje profesional con temáticas tratadas en los módulos de Comunicaciones Analógicas, Comunicaciones Digitales, Comunicaciones Inalámbricas, Comunicaciones Avanzadas, Comunicaciones Móviles, Redes de Comunicación de Datos, que permiten emplear la tecnología SDR ( Radio Definido por Software) para el desarrollo de prácticas.

Los módulos antes mencionados tienen un total de 22 créditos los mismos que han servido como base para el desarrollo del presente trabajo de investigación en vista que forman parte fundamental para cualquier sistema de comunicaciones, en la tabla 12 se muestran las asignaturas y temáticas que fueron utilizadas para el desarrollo de las diversas prácticas.

**Tabla 12.** Análisis de Asignaturas para el desarrollo de prácticas.

ASIGNATURA	CRÉDITOS	TEÓRICO	PRÁCTICO	CONTENIDOS	PRÁCTICAS RELACIONADAS
<b>COMUNICACIONES ANALÓGICAS</b>	2 horas	2 horas	2 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulaciones Analógicas AM y FM.</li> <li>• Demodulaciones Analógicas AM y FM.</li> <li>• Índice de modulación AM.</li> <li>• Alteraciones de la señal</li> </ul>	Transmisor y Receptor AM (Práctica N°3). Perturbaciones de la señal (Práctica N°6). Manejo Básico de GNU Radio y USRP N210 (Práctica N°2). Inhibidor de señal (Práctica N°4). Transmisor y Receptor FM (Práctica N°5).
<b>COMUNICACIONES DIGITALES</b>	4 horas	2 horas	2 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulaciones digitales QAM y PSK.</li> <li>• Demodulaciones digitales QAM y PSK</li> <li>• Teorema de Nyquist.</li> </ul>	Modulación y Demodulación M PSK (Práctica N°7). Modulación y Demodulación 4QAM (Práctica N°8).

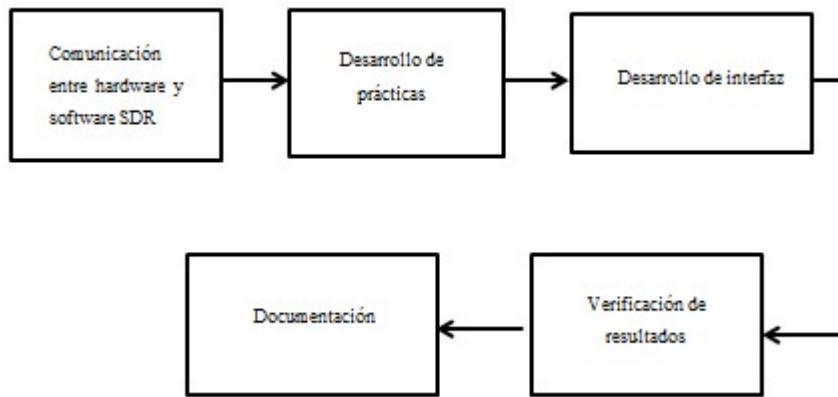
<b>COMUNICACIONES INALAMBRICAS</b>	4 horas	2 horas	2 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OFDM</li> </ul>	Técnica de Reducción de PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) en OFDM (Práctica N°9)
<b>REDES DE COMUNICACIÓN DE DATOS</b>	3 horas	2 horas	1 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelos de red</li> </ul>	Conexión entre GNU Radio y USRP N210 (Práctica N°1). Red GSM (Práctica N°10). Modulación y Demodulación M PSK (Práctica N°7). Modulación y Demodulación 4QAM (Práctica N°8). Transmisor y Receptor AM (Práctica N°3). Manejo Básico de GNU Radio y USRP N210 (Práctica N°2). Inhibidor de señal (Práctica N°4). Transmisor y Receptor FM (Práctica N°5).
<b>COMUNICACIONES AVANZADAS</b>	4	2	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asterisk.</li> <li>• OpenBTS.</li> </ul>	Red GSM (Práctica N°10).

				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servidor</li> </ul>	
<b>COMUNICACIONES MÓVILES</b>	3 horas	2 horas	1 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementos de una estación GSM.</li> </ul>	Red GSM (Práctica N°10).

**Elaborado por:** Investigadora.

### **3.2. Desarrollo de la propuesta**

Para el desarrollo de la propuesta se toma en cuenta las siguientes etapas descritas en el siguiente esquema:



**Figura 8.** Proceso de la propuesta.

**Elaborado por:** Investigadora.

#### **3.2.1. Comunicación entre hardware y software de SDR**

Para establecer comunicación entre el hardware y software de SDR, se debe analizar el modelo de USRP a utilizar en este caso se emplea el modelo N210 el cual tiene comunicación mediante Gigabit Ethernet, para ello es necesario que la PC disponga de un puerto de estas características y en caso de contar con ello se requiere de un adaptador USB – Gigabit Ethernet, el procedimiento para establecer comunicación es el siguiente:

##### **1. Asigna una IP estática al PC:**

Para asignar una dirección IP estática se debe configurar manualmente la tarjeta de red de la PC, como se muestra en la figura 9, la cual consta de la puerta predeterminada 192.168.10.2, la dirección IP de la PC 192.168.10.3, la máscara de

sub red 255.255.255.0, la conexión que se establece entre el hardware y software es GigabitEthernet.



**Figura 9.** Asignación de dirección IP.

**Elaborado por:** Investigadora.

**Nota:** Se debe asignar una IP que se encuentre dentro de la Sub red 10, ya que por defecto la IP asignada por el fabricante del USRP N210 es la 192.168.10.2, se puede hacer uso de diferentes software para escanear la sub red del USRP N210.

## 2. Verificación de Comunicación:

Una vez asignada la dirección IP, se procede a verificar la conexión y comunicación entre el hardware USRP N210 y el software GNU Radio, para ello se ejecuta los siguientes comandos *uhd\_find\_devices* y *uhd\_usrp\_probe* cuya funcionalidad es detectar e inspeccionar los dispositivos que van a usarse, como se visualiza en la figura 10 al ejecutar el comando *uhd\_find\_devices* despliega información de todos los dispositivos USRP que se encuentran en la red ofreciendo información técnica como el tipo de USRP, serial, IP asignada entre otros aspectos.

```
vanesa@vanesa-Inspiron-5520:~ uhd_find_devices
linux; GNU C++ version 5.3.1 20151219; Boost_105800; UHD_003.009.002-0-unknown
-----
-- UHD Device 0
-----
Device Address:
  type: usrp2
  addr: 192.168.10.2
  name:
  serial: 311146C
```

**Figura 10.** Comprobación del comando *uhd\_find\_devices*.

**Elaborado por:** Investigadora.

Con la ejecución del comando *uhd\_usrp\_probe*, se visualiza información detallada del USRP a usar, como los rangos de frecuencia con los que se puede trabajar, rango

de ganancia de PGA que va de 0 a 31 dB, tarjetas secundarias instaladas, entre otros aspectos técnicos como se muestra en la figura 11.

```

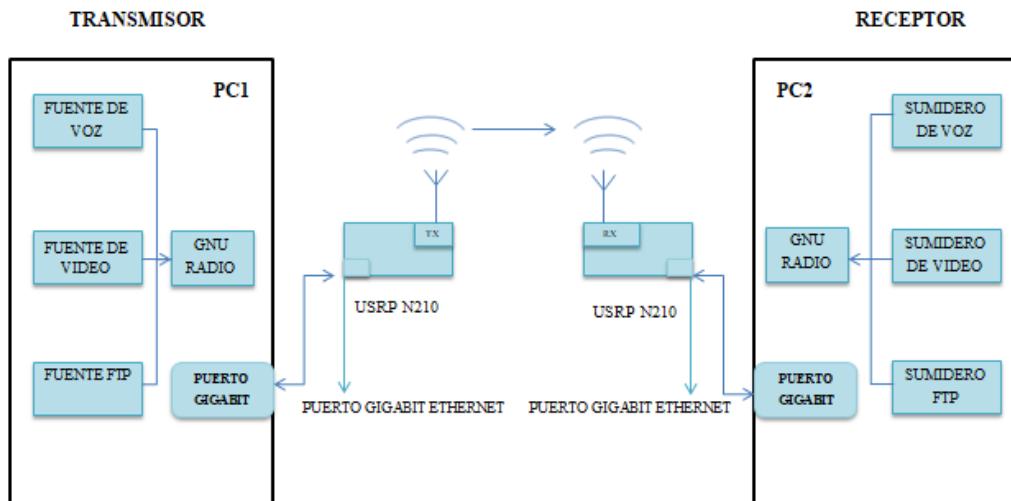
vanessa@vanessa-inspiron-5520:~ EnvironmentError: OSError: error in pthread_setschedparam
Device: USRP2 / N-Series Device
Mboard: N210r4
hardware: 2577
mac-addr: 00:00:2f:16:b7:91
ip-addr: 192.168.18.2
subnet: 255.255.255.255
gateway: 255.255.255.255
gpsdo: none
serial: 311146C
FW Version: 12.4
FPGA Version: 11.1
Time sources: none, external, _external_, ntno
Clock sources: internal, external, ntno
Sensors: ntno_locked, ref_locked
RX DSP: 0
Freq range: -50.000 to 50.000 MHz

```

**Figura 11.** Comprobación del comando uhd\_usrp\_probe.

Elaborado por: Investigadora.

### 3.2.2. Esquema de un sistema de comunicación basado en SDR empleando los dispositivos USRP N210



**Figura 12.** Sistema de comunicación basada en SDR empleando USRP N210.

Elaborado por: Investigadora.

## **HARDWARE:**

La FISEI dispone de estaciones USRP N210 que incluyen dos tipos de antenas VERT900 y VERT2450 sin tarjetas secundarias; al realizar aplicaciones de bandas comerciales de FM se emplea la antena VERT900, las mismas que son conectadas en el panel frontal dependiendo si transmitirán o receptaran la información , la forma de conexión que usa el dispositivo es GIGABIT ETHERNET por lo que la PC debe tener este puerto disponible al no contar con este se puede adquirir un conversor USB- GIGABIT ETHERNET con un costo en el mercado de 20 dólares aproximadamente, la configuración en el bloque UHD debe ser modificado a TX o RX.

Para desarrollo de cada una de las prácticas es necesario que los equipos cuenten con ciertas características que permitirán un funcionamiento adecuado. El ordenador debe cumplir con las siguientes especificaciones.

- Sistema operativo Ubuntu 16 LTE.
- Procesador i5 o superior
- Memoria RAM de 8GB
- Adaptador Gigabit Ethernet

## **SOFTWARE:**

El software empleado para las prácticas es GNU Radio el mismo que puede ser instalado en sistemas operativos como Windows y Linux, al analizar su estabilidad se emplea la distribución de Ubuntu en su versión 16.04 LTE la misma que permite instalar las librerías que se utilizara para la red GSM con el proyecto Open BTS.

Queda a elección del estudiante instalar GNU Radio en Windows, Ubuntu o a su vez instalarlo en una máquina virtual, en el Anexo C se puede encontrar todos los instaladores, o a su vez descargarlos google drive a través del siguiente link  
<https://drive.google.com/drive/folders/1LDdSIPgQCyYntNNI9X9lb3XfUSjh2jMV?usp=sharing>

### 3.2.3. Desarrollo de prácticas

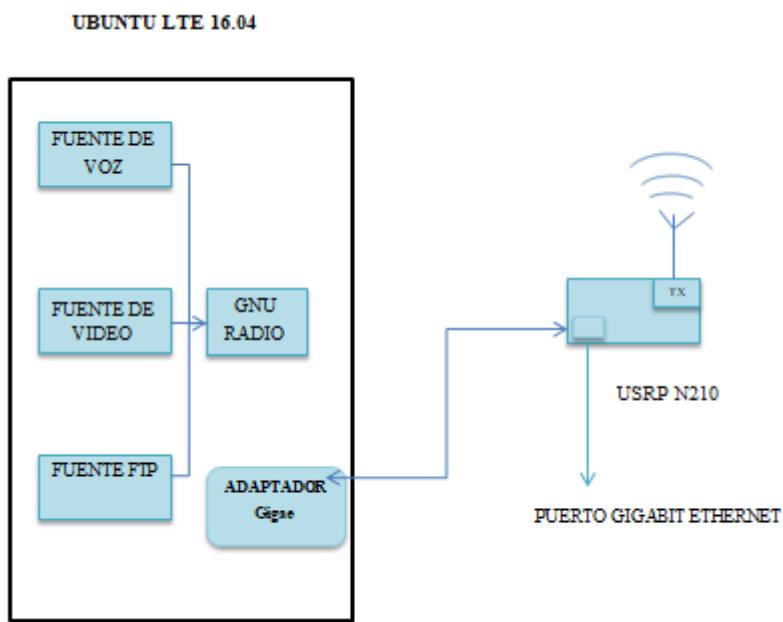
A continuación, se expone el desarrollo de todas las prácticas efectuadas, como anexo se adjunta la guía de práctica de cada una de ellas:

#### Práctica N°1

##### Tema:

Conexión entre GNU Radio y USRP N210.

El Objetivo principal de la siguiente práctica fue establecer la conexión entre hardware y software SDR disponible en el Laboratorio de Comunicaciones de la Facultad, para ello debe seguir la figura 13:



**Figura 13.** Esquema de Conexión Física entre GNU Radio y USRP N210.

**Elaborado por:** Investigadora.

#### Instalación el sistema operativo Ubuntu 16.04 LTE.

Se puede instalar el sistema operativo particionando el disco duro, o a su vez instalarlo en una máquina virtual, dependiendo de la necesidad del estudiante, como se describe a continuación:

## **Particionar el disco duro**

Se efectúa la partición en la unidad que se tenga disponible, seguidamente se inicializa la BIOS donde se selecciona la ISO del sistema operativo previamente desmontado y se configura según sea la necesidad del usuario.



**Figura 14.** Pantalla de inicio de Ubuntu 16.04 LTE.

**Elaborado por:** Investigadora.

## **Máquina Virtual**

Se puede utilizar virtual Box ya que es un software de virtualización de máquinas virtuales muy estable, para ello la PC debe tener una capacidad de 8 GB de RAM para que pueda montarse el sistema operativo sin inconvenientes, en el siguiente link se pueden descargar la máquina e importarla <https://drive.google.com/drive/folders/1LDdSIPgQCyYntNNI9X9lb3XfUSjh2jMV?usp=sharing>

## **Instalación de GNU Radio.**

Se procede a instalar por consola el programa GNU Radio mediante los siguientes comandos, los cuales permiten actualizar los repositorios de GNU Radio, repositorios en general e instalar el programa:

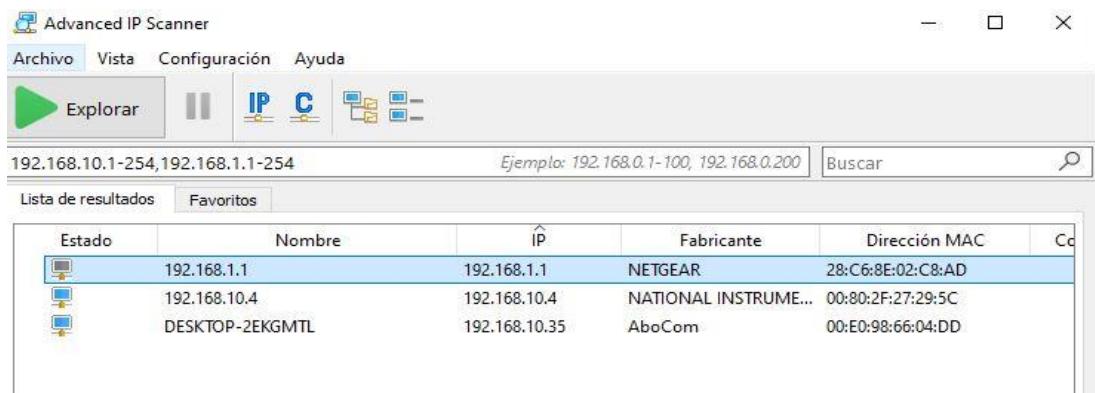
```
sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases
```

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install gnuradio
```

### Detección de Sud red de USRP N210.

Se emplea el programa Advanced IP Scanner para determinar la subred del dispositivo como se muestra en la figura 15.



**Figura 15.** Identificación de sub red de USRP N210.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Asignación de una IP estática en la PC.

Conocida la subred se agrega una IP estática que este dentro del rango de la sub red como se visualiza en la figura 16, para verificar cada paso a detalle revisar el Anexo C.



**Figura 16.** Asignación de IP estática.

**Elaborado por:** Investigadora.

## Práctica N°2

### Tema:

Manejo de herramientas de GNU Radio.

El objetivo de la práctica es que el estudiante se familiarice con los elementos que presenta GNU Radio, en el literal A se propone generar y analizar ondas mediante sources y sink del software, con QT GUI y WX GUI, en las mismas se puede visualizar la respuesta de la señal tanto en tiempo como en frecuencia, además se propone un literal b en el cual se realiza un analizador de espectros en la banda UHF, la guía se encuentra en el Anexo D.

Para ello se efectuaron los siguientes pasos:

#### A) Generación y análisis de ondas.

##### Pasos

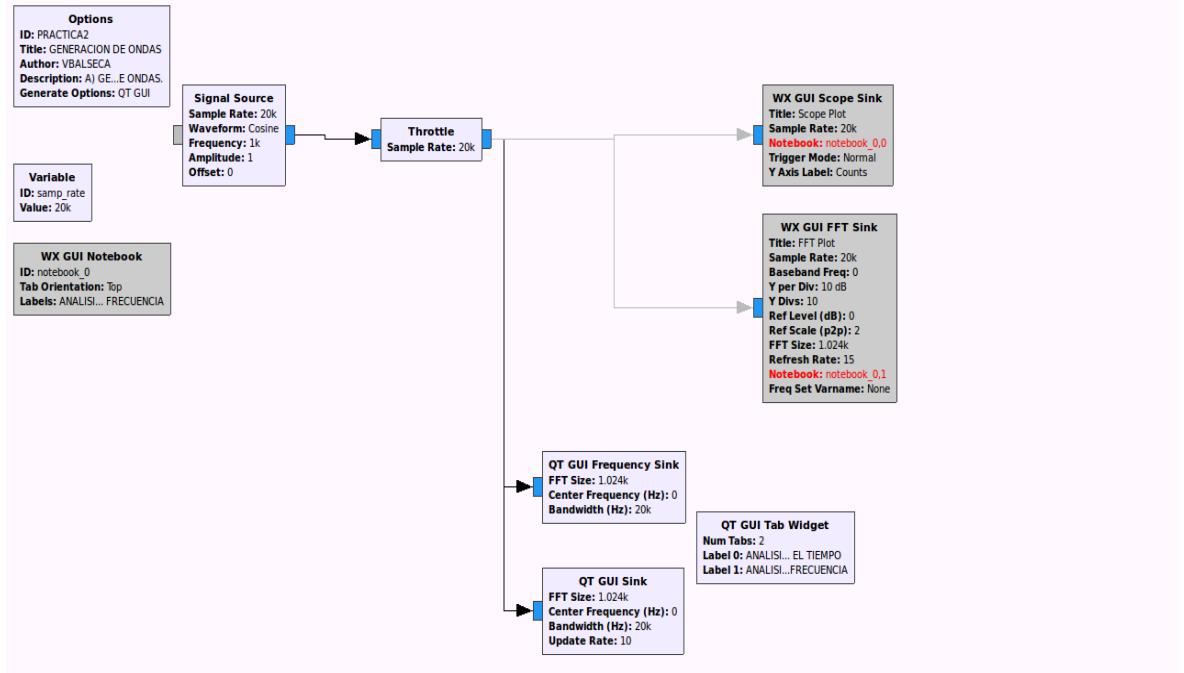
1. Generar una onda con los siguientes parámetros expuestos en la tabla 13.

**Tabla 13.** Parámetros para la generación de señales.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	20 KHz
Frecuencia de operación	1KHz
Amplitud	1
Forma de onda	Coseno

Elaborado por: Investigadora

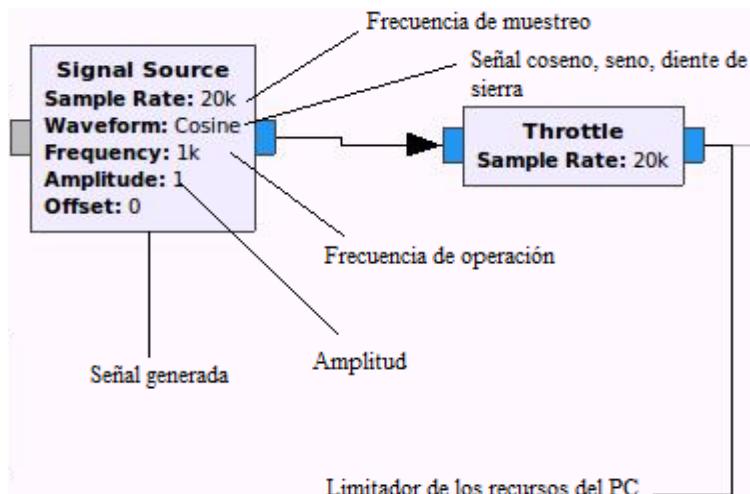
A continuación se muestra en la figura 17 el esquema usado para la implementación de la práctica y la descripción de cada bloque empleado.



**Figura 17.** Esquema de generación de ondas.

Elaborado por: Investigadora

Para la generación de la señal de la onda se usa el bloque SIGNAL SOURCE, el cual permite configurar los parámetros como la frecuencia de muestreo, forma de onda, frecuencia de operación y la amplitud, como se muestra en la figura 18, además el uso del limitador de recursos el cual tiene el mismo valor de la frecuencia de muestreo para que no se excedan las muestras que se generan.



**Figura 18.** Generación de señal cosenoidal.

Elaborado por: Investigadora

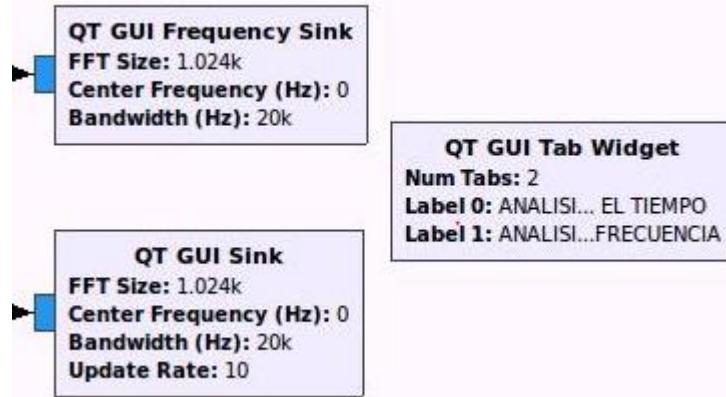
Para el análisis en frecuencia y tiempo con QT GUI se emplea los bloques mostrados en la figura 19, su uso se describe a continuación:

### QT GUI Frequency Sink

Este bloque permite analizar la señal en frecuencia, el único parámetro que se configura es el ancho de banda con un valor de 20 KHz.

### QT GUI Sink

Este bloque permite analizar la señal en tiempo al igual que el bloque anterior configura el ancho de banda, para la visualización de los resultados obtenidos tanto en tiempo como en frecuencia se usa la herramienta de QT GUI Tab Widget, dicha herramienta permite mostrar los resultados en una sola pantalla dividida en ventanas.



**Figura 19.** Bloques QT GUI para análisis en frecuencia y tiempo.

**Elaborado por:** Investigadora

En cuanto a WX GUI los bloques empleados se visualizan en la figura 20, y la descripción de cada uno:

### WX GUI Scope Sink

Permite visualizar la respuesta de la señal de la onda en tiempo, el parámetro que se configura es la frecuencia de muestreo, como el resultado tanto en tiempo como en frecuencia se van a visualizar en una sola pantalla con ventanas se hace uso de la herramienta WX GUI Notebook, señalando la posición de cada ventana.

## WX GUI FFT Sink

Permite visualizar los resultados en frecuencia, al igual que el bloque anterior se configura el valor de la frecuencia de muestreo y la posición de la ventana en la que se despliega el resultado.



**Figura 20.** Bloques WX GUI para análisis en frecuencia y tiempo.

Elaborado por: Investigadora

## B) Diseño de un analizador de Espectros

Realizar un analizador de espectros del ancho de banda de la portadora de audio de los sistemas de televisión analógica expuesta en la tabla 14.

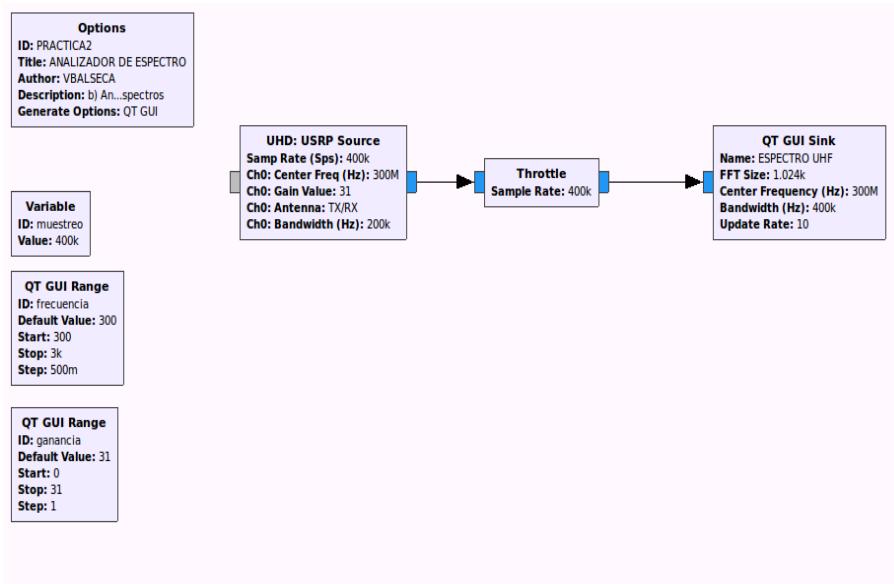
**Tabla 14.** Parámetros para un Analizador de Espectros UHF.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	400 KHz
Frecuencia de operación	300-3000 KHz el proceso de MHz a GHz lo efectúa el USRP
Ganancia	1 -31 dBi

Elaborado por: Investigadora.

## Pasos:

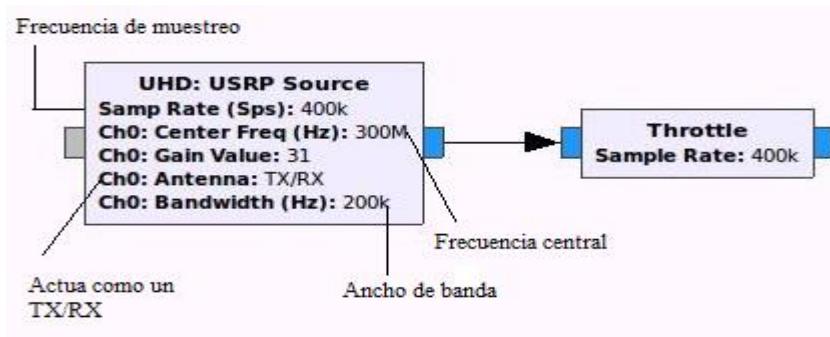
1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210, expuesto en la práctica anterior
2. Implementar el analizador de espectros UHF expuesto en la figura 21.



**Figura 21.** Analizador de espectros UHF.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para analizar el espectro UHF se emplea el bloque UHD USRP SOURCE mostrado en la figura 22, el cual permite obtener la onda mediante el procesamiento del USRP N210 a través de este bloque, el mismo es configurado mediante los parámetros descritos en la tabla 14.



**Figura 22.** UHD USRP SOURCE para el Analizador UHF.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para la visualización de los resultados del analizador UHF, se emplea el bloque QT GUI Sink mostrado en la figura 23, configurado con frecuencia central de 300MHz, ancho de banda de 400 KHz



**Figura 23.** Bloque para la visualización de resultados del analizador UHF.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Práctica N°3

#### Tema:

Transmisor y receptor AM

El objetivo de la práctica es que el estudiante conozca las etapas que se presenta en la modulación y demodulación AM mediante un transmisor y receptor AM empleando los bloques que posee GNU para AM, así como un literal C en el cual se efectúa la modulación al 50,100,125 y 175 %, para lo cual se procede de la siguiente manera:

#### A) Implementación y configuración del esquema del transmisor AM.

Para la implementación y configuración se toma en cuenta los siguientes parámetros mostrados en la tabla 15.

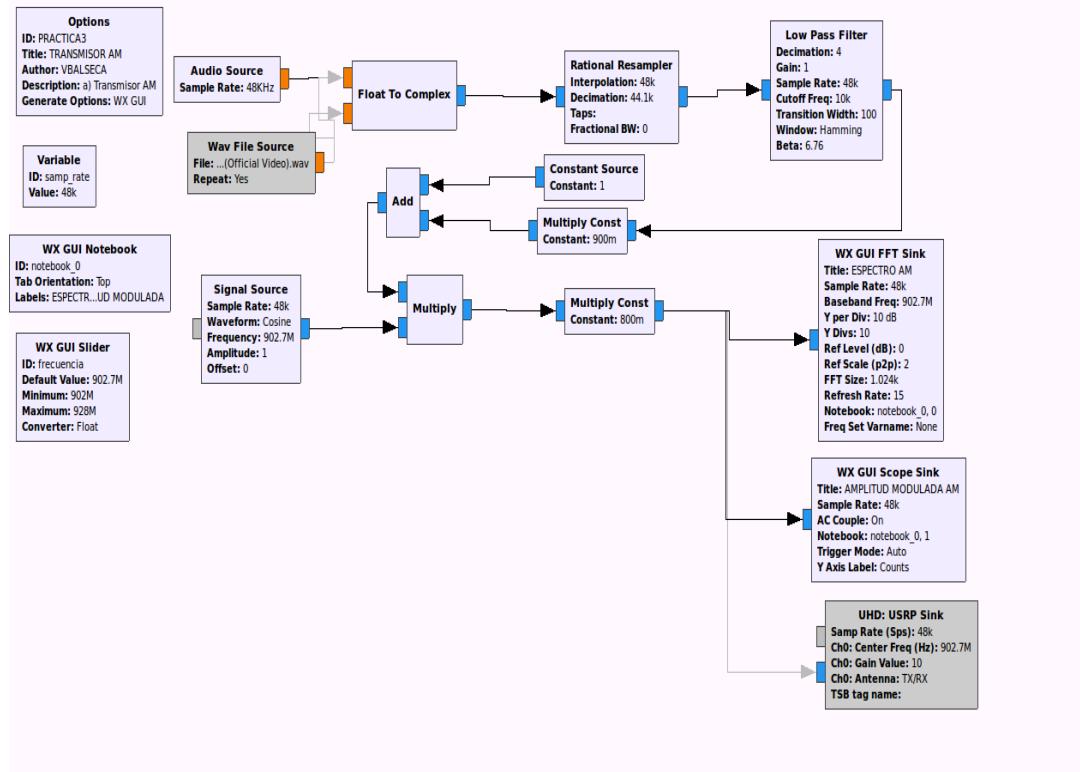
**Tabla 15.** Parámetros del Transmisor AM.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	48 a 96 KHz
Frecuencia modulante	902-928 MHz
Frecuencia de corte	10KHz

**Elaborado por:** Investigadora.

## Pasos

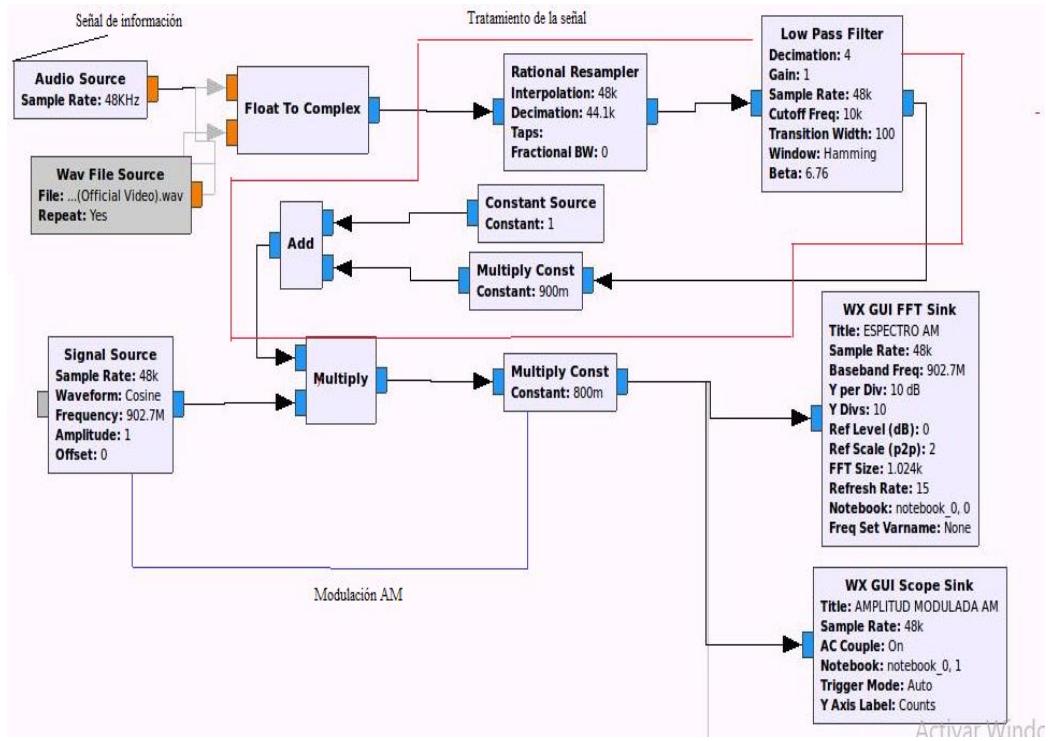
1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210 descrito en la primera práctica.
2. Implementar el transmisor AM expuesto en la figura 24.



**Figura 24.** Transmisor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

El esquema del transmisor AM está compuesto por etapas como la señal de información obtenida mediante el bloque Audio Source, el tratamiento de la señal mediante remuestreo, filtro pasa bajo, la modulación efectuada por una señal generada en GNU Radio, y finalmente la visualización de los resultados mediante WX GUI tanto en tiempo como en frecuencia, como se muestra en la figura 25, cada detalle de la configuración de cada bloque se encuentra en el anexo E.



**Figura 25.** Etapas del transmisor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

### B) Implementación y configuración del esquema del receptor AM.

Los parámetros que se emplean en el receptor se encuentran expuestos en la tabla 16.

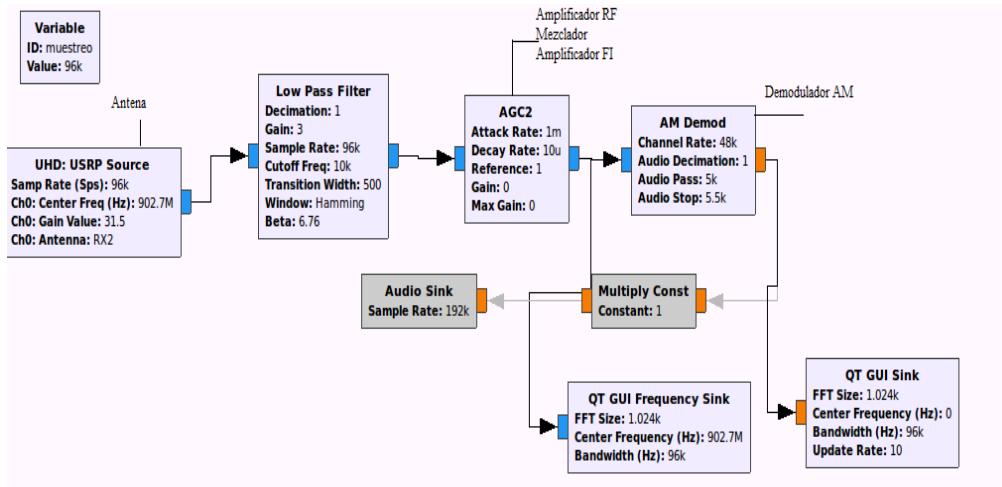
**Tabla 16.** Parámetros para el Receptor AM.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	48 a 96 KHz
Decimación	1 debido a que el audio ya estaba procesado anteriormente.
Ganancia	1 - 31.5 depende de la necesidad del usuario.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Pasos

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del receptor AM mostrado en la figura 26.



**Figura 26.** Receptor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

La figura 26 muestra el bloque UHD USRP el mismo que actúa como antena receptora de la señal con los parámetros descritos la tabla 16, seguido de un filtro pasa bajo para eliminar las señales indeseadas y poder procesarla a 96 KHz, el proceso de amplificador RF, mezclador y Amplificador FI se lo efectúa mediante el bloque AGC2 en cual ayuda a mantener un control automático de ganancia es decir permite controlar la amplitud en un valor determinado y mantenerlo en ese valor, el bloque del demodulador AM en GNU Radio permite la conversión descendente de banda limitada en la señal de banda base original empleando un filtro pasa bajo y finalmente se visualiza los resultados mediante los bloques QT GUI tanto en tiempo y frecuencia, la configuración de cada uno de los bloques se encuentra en el anexo E.

### C) Implementación, y configuración del esquema de índices de modulación AM

Para el desarrollo de este ítem los parámetros que se usan están expuestos en la tabla 17.

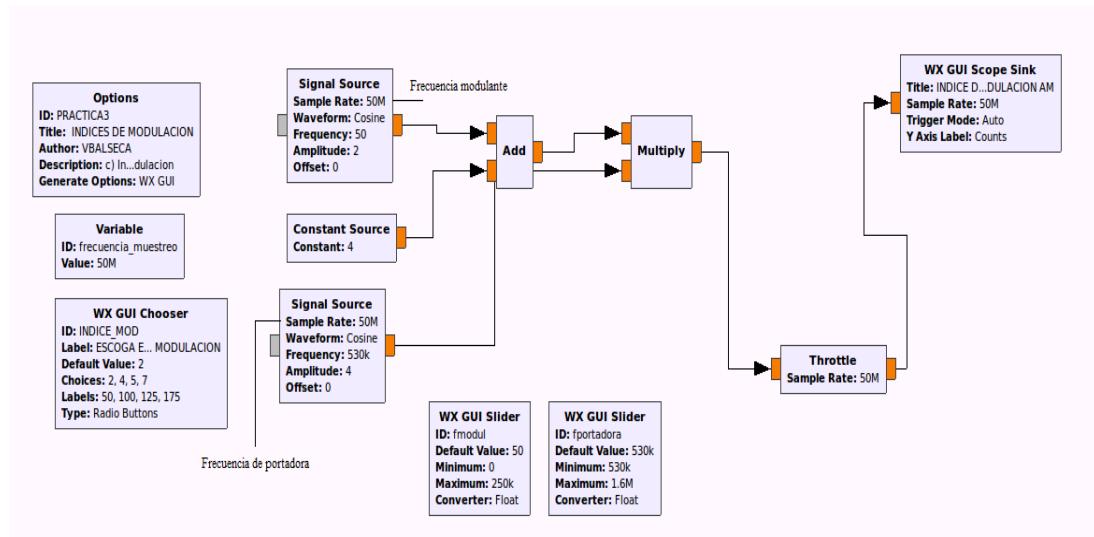
**Tabla 17.** Parámetros para los índices de modulación AM.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de portadora	530 KHz – 1.6 MHz
Frecuencia de moduladora	0-250 KHz

**Elaborado por:** Investigadora.

## Pasos

1. Implementar el esquema de índices de modulación AM de la figura 27.



**Figura 27.** Esquema para índices de modulación AM.

Elaborado por: Investigadora.

El esquema consta de dos señales cuya configuración se encuentra en el anexo E, la frecuencia modulante es generada por Signal Source y su valor varia para obtener una modulación al 50 %, 100 %, 125% y 175 % mediante el bloque WX GUI Chooser, para cambiar los valores de las frecuencias se emplea el bloque WX GUI Slider con los rangos expuestos en la tabla 17, y finalmente para la visualización se emplea WX GUI Scope Sink, hay que tener en cuenta que no se pueden mezclar bloques QT GUI y WX GUI ya que al generar el programa darán inconvenientes por ser de diferente naturaleza.

## Práctica N°4

### Tema:

Inhibidor de señales FM.

La práctica tiene como objetivo mostrar al estudiante como una fuente de ruido puede afectar la transmisión de una señal FM, además al variar la frecuencia puede

afectar a enlaces con equipos Ubiquiti, en frecuencia de 2,4 GHz como son los equipos Nano Loco y Nano Station, la guía se encuentra disponible en el Anexo F. Para ellos se emplearon los siguientes pasos:

#### A) Implementación y configuración del esquema inhibidor de señales FM.

Para la práctica se emplea los siguientes parámetros de la tabla 18.

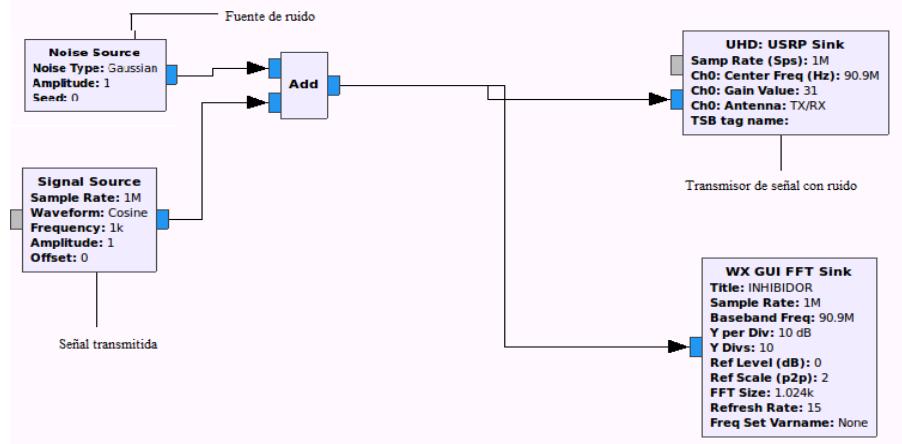
**Tabla 18.** Parámetros para el Receptor AM.

PARÁMETROS	VALORES
Fuente de ruido	Gaussiano
Frecuencia de operación	88 a 108 MHz
Ganancia	1 a 31 dBi
Forma de onda	Cosenoidal
Frecuencia de la onda	1 KHz
Frecuencia de muestreo	1 MHz

**Elaborado por:** Investigadora.

#### Pasos:

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del inhibidor de señales de la figura 28.



**Figura 28.** Inhibidor de señal.

**Elaborado por:** Investigadora.

La figura 28 muestra un inhibidor de señales FM, el cual se consta de una fuente de ruido usando el bloque Noise Source de tipo Gausiano con una amplitud de 1, al cual se le añade una señal generada por la fuente de GNU Radio Signal Source, la señal de onda obtenida es la que se genera para inhibir una señal de Radio comercial FM, el bloque UHD USRP Sink permite transmitir esta señal que inhibe la transmisión normal de la emisora FM.

## Práctica N°5

### Tema:

Transmisor y Receptor FM

En esta práctica se desarrolla un transmisor y receptor de banda comercial FM, analizando las etapas tanto de la modulación y demodulación FM, para ello se emplearon los siguientes pasos, se puede visualizar con más detalle de la práctica en el Anexo G:

#### A) Implementación y configuración del esquema de transmisor FM.

Para la implementación y configuración del transmisor FM se emplean los parámetros de la tabla 19.

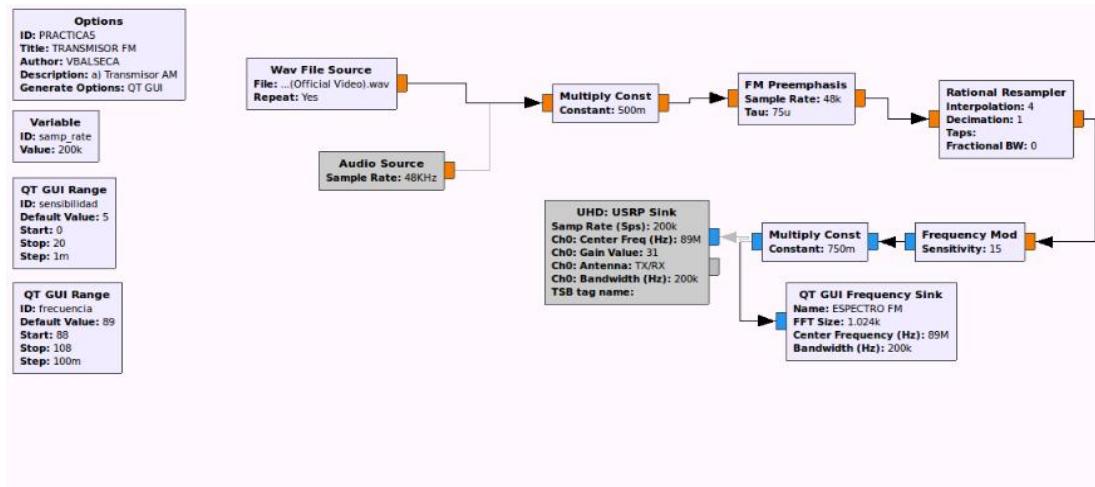
**Tabla 19.** Parámetros del Transmisor FM.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	48KHz
Frecuencia de operación	88 a 108 MHz
Ganancia	1 a 31 dBi
Ancho de banda	200KHz

**Elaborado por:** Investigadora.

### Pasos:

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del Transmisor FM mostrado en la figura 29.



**Figura 29.** Transmisor FM.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 29 se observa que la fuente de información del transmisor FM es un archivo de audio o a su vez puede ser un audio obtenido desde la tarjeta de sonido de la PC, se procede a multiplicar para que pueda efectuar el proceso de pre énfasis para enfatizar las frecuencias de audio y mitigar el ruido de alta frecuencia el valor de  $T = 75\mu$ s segundos la cual es usada para la región 2 (America) y con una frecuencia de 2,121KHz, el bloque Rational Resampler remuestrea las frecuencias del USRP N210, el bloque Frequency Mod permite efectuar la modulación en frecuencia el valor de la sensibilidad es de 15 ya que el valor de frecuencia máxima para FM de 75 KHz para canales de banda ancha de estaciones FM, y se transmite la señal mediante el bloque UHD USRP Sink.

### B) Implementación y configuración del esquema receptor FM.

Para implementar el esquema del receptor se toma en cuenta los parámetros de la tabla 20.

**Tabla 20.** Parámetros para el receptor FM.

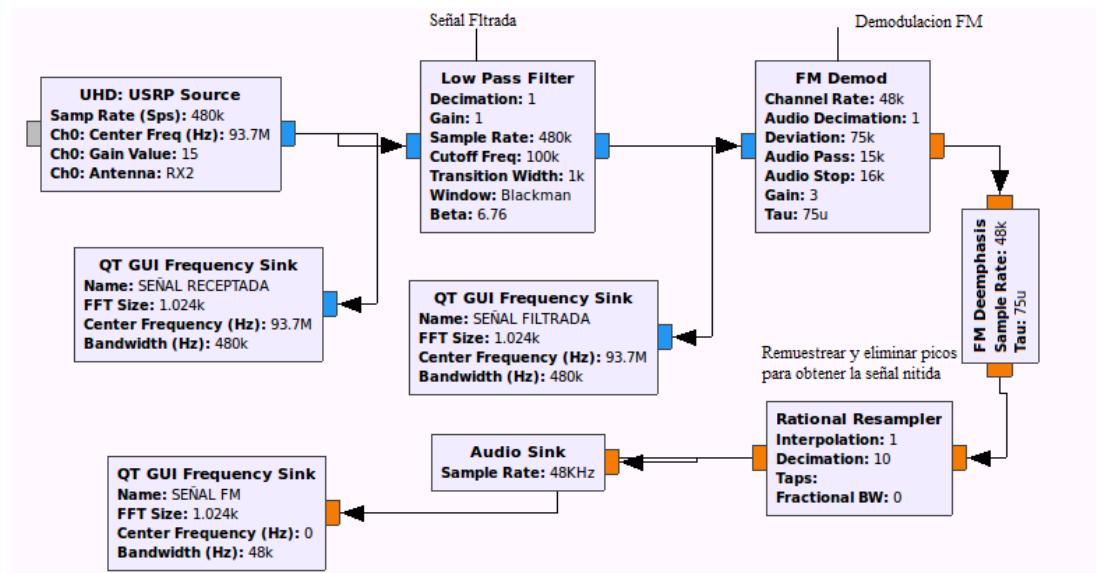
PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	480KHz
Tau	75 $\mu$ Valor determinado para región 2
Ganancia	1 a 31 dBi

Decimación	1- 10 dependiendo del valor anterior
------------	--------------------------------------

Elaborado por: Investigadora.

## Pasos

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del receptor FM de la figura 30.



**Figura 30.** Receptor FM.

Elaborado por: Investigadora.

Una vez realizada la transmisión se debe efectuar el receptor mediante la figura 30 se puede observar que el bloque UHD USRP Source recepta la información la frecuencia de muestreo es 480 KHz seguidamente se filtra la señal para que se normalice al formato de frecuencia del audio enviado, la demodulación usa el valor de  $T = 75\mu$ s segundos seguido de la etapa de De- Énfasis para obtener una respuesta de frecuencia plana, finalmente se remuestra la señal para que pueda ser audible en el formato original del sonido de 48 KHZ.

## Práctica N°6

### Tema:

Perturbaciones de la señal

En la práctica se desarrolla las perturbaciones que se presentan en un canal de comunicaciones, además la potencia transmitida y receptada para el contraste de valores, para ello se emplea herramientas matemáticas de los bloques de GNU Radio, se realiza el siguiente procedimiento, el mismo se encuentra disponible en el Anexo H.

#### A) Implementación y configuración del esquema de perturbaciones de la señal.

Para la implementación de esta práctica se emplean los parámetros que se muestran en la tabla 21.

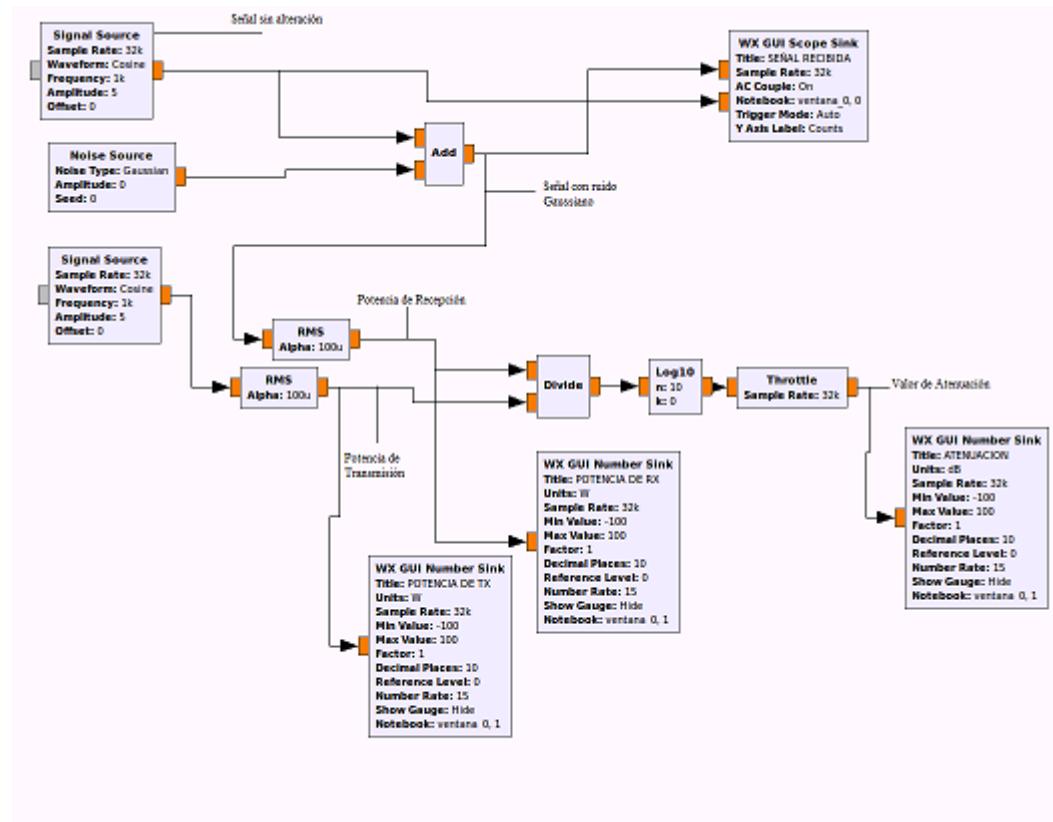
**Tabla 21.** Parámetros para las Perturbaciones de la señal.

PARÁMETROS	VALORES
Frecuencia de muestreo	32KHz
Frecuencia de operación	1 KHz
Fuente de Ruido	Gaussiano
Ruido	0 -1
Atenuación	1- 100

**Elaborado por:** Investigadora.

### Pasos

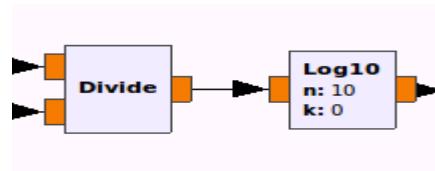
1. Implementar el esquema del canal de comunicaciones para las perturbaciones de la señal de la figura 31.



**Figura 31.** Implementación de la simulación del canal de comunicaciones.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 31 se tiene esquema para la simulación de las perturbaciones que sufren las señales se efectúa un canal de comunicación ya que estos efectos se producen en el mismo, se tiene generadas dos señales una de las cuales tiene una fuente de ruido de tipo Gausiano, en las mismas se pueden ser calculadas la potencia mediante los bloques matemáticos que presenta GNU Radio, así como el valor de la atenuación que se presenta, para el cálculo de las potencia de transmisión y recepción se empleó los bloques de la figura 32.



**Figura 32.** Bloques para cálculo de potencias

**Elaborado por:** Investigadora.

## Práctica N°7

### Tema:

Modulación y demodulación digital M- PSK.

La práctica permite al estudiante realizar la modulación y demodulación PSK, en la cual se pueden visualizar las constelaciones, además de analizar los parámetros que influyen en las modulaciones y demodulación M –PSK, para ello se efectúa lo siguiente:

A) Implementación del esquema de modulación PSK.

### Pasos:

1. Comunicar el GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del modulador PSK de la figura 33.

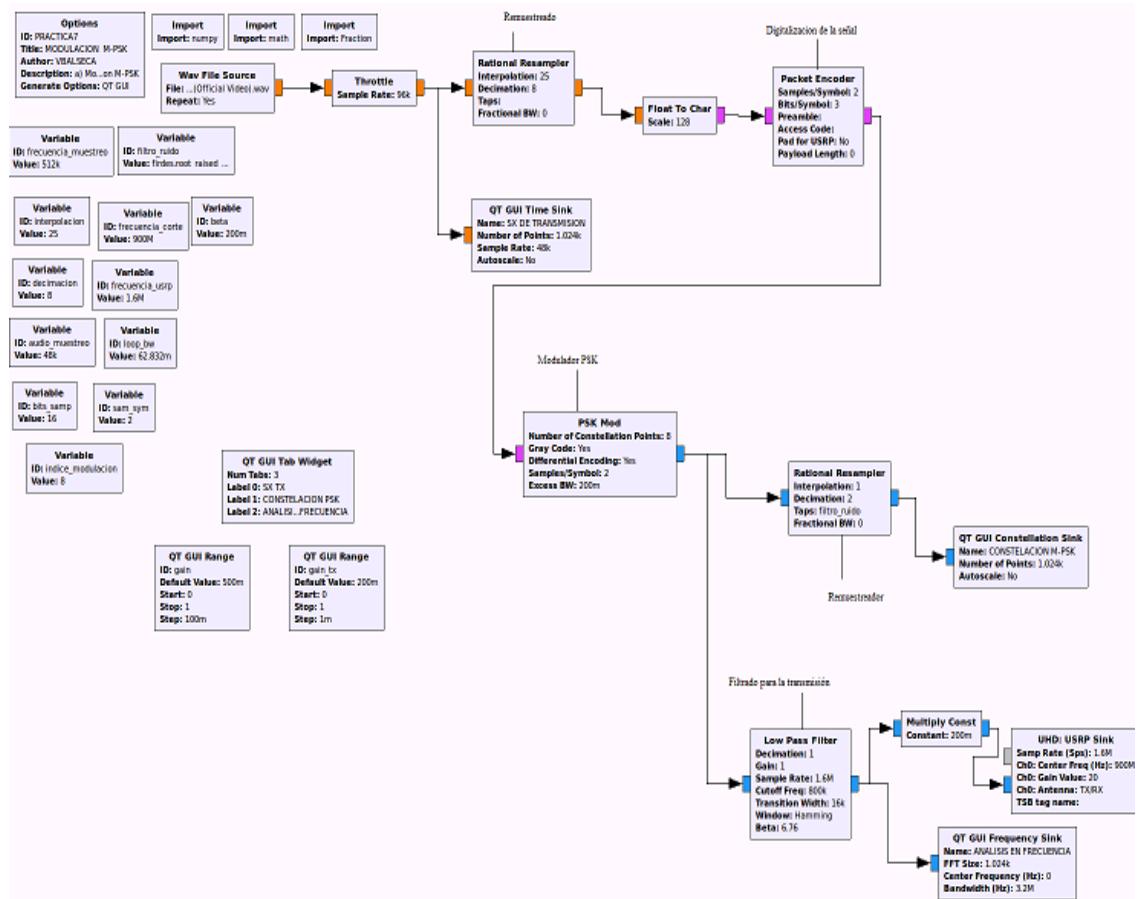


Figura 33. Implementación Modulador M-PSK.

Elaborado por: Investigadora.

En la figura 33 se observa que como fuente de información se tiene un archivo de audio con formato wav, para lo que se debe remuestrear y transformar el tipo de datos de float a chart para que sea digitalizado mediante el bloque Packet Encoder y pueda ser modulado en PSK, para visualizar constelación se efectúa un nuevo remuestreo, finalmente para la transmisión de la señal se pasa por un filtro pasa bajo, se emplea varias variables como:

***Frecuencia\_muestreo:***

```
int(audio_muestreo*bits_samp*sam_sym/math.log(indice_modulacion,2))
```

***Filtro\_ruido:***

```
firdes.root_raised_cosine(1,frecuencia_usrp,frecuencia_usrp/2,beta,32)
```

***Interpolación:***

```
int (Fraction (frecuencia_usrp, frecuencia_muestreo). numerator)
```

***Decimación:***

```
int (Fraction (frecuencia_usrp, frecuencia_muestreo). denominator)
```

El valor de cada una de ellas se encuentra en el anexo I.

**3. Importar las librerías pertinentes.**

Las librerías usadas son matemáticas y basta con llamarlas desde GNU Radio con los siguientes nombres:

```
import numpy
```

```
import math
```

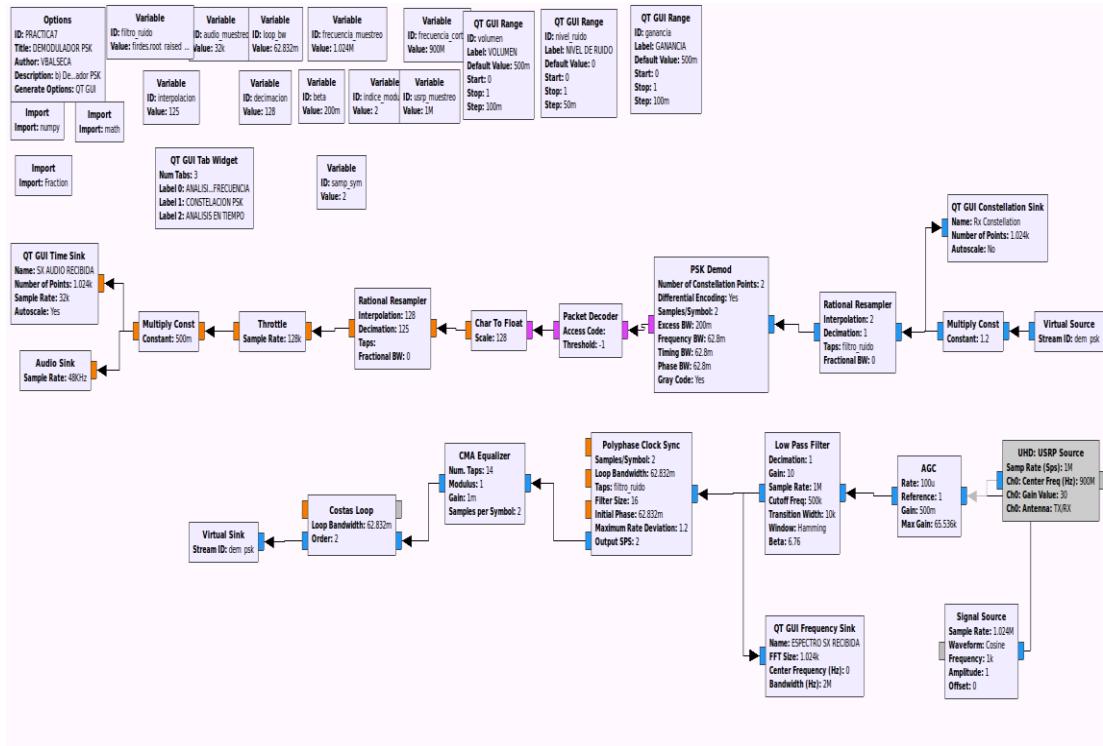
```
from fractions import Fraction
```

**B) Implementación el demodulador PSK como se muestra en la figura 34:**

Una vez efectuado el modulador se procede a efectuar el demodulador mediante el siguiente procedimiento:

**Pasos:**

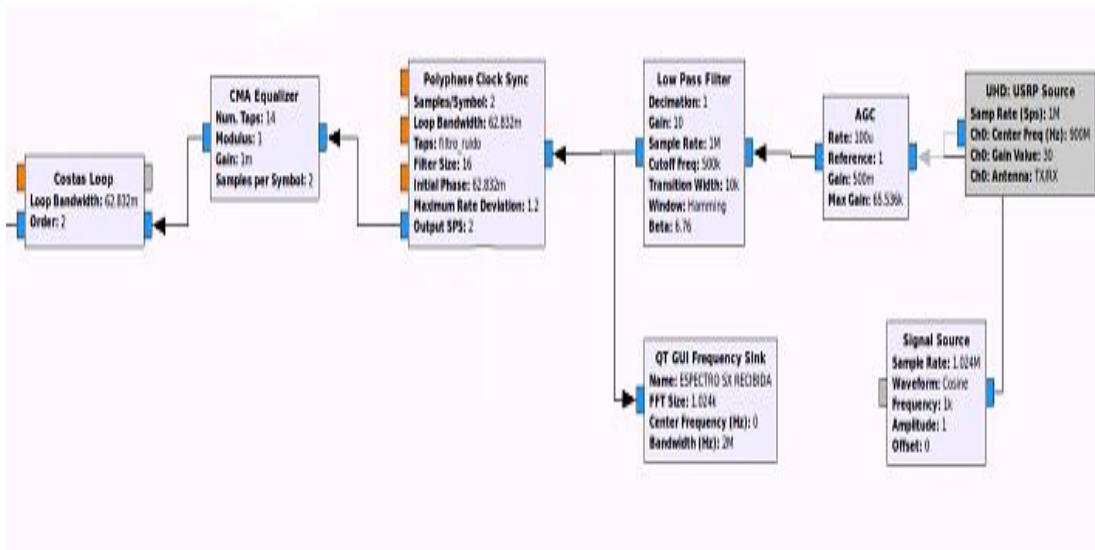
1. Comunicar el GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el demodulador PSK mostrado en la figura 34.



**Figura 34.** Demodulador M-PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

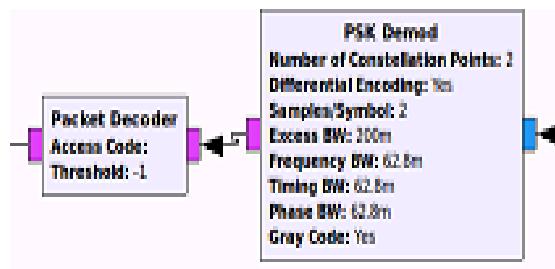
Para la demodulación de la señal se muestra en la figura 35 un conjunto de bloques que son empleados para la sincronización de la información entre el transmisor y el receptor compuestos por filtro pasabajo, AGC, sincronizados mediante filtros polifásicos de tipo coseno alzado, filtros adaptativos, que permiten establecer mejor la comunicación entre transmisor y receptor.



**Figura 35.** Sincronización entre TX Y RX.

**Elaborado por:** Investigadora.

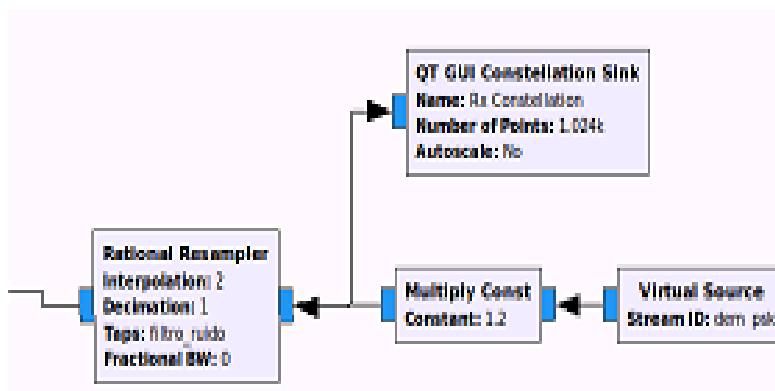
Para la digitalización y demodulación se emplea los bloques de la figura 36, en estos bloques se debe tener en cuenta que al aumentar la muestra de símbolos se aumenta los bits erróneos.



**Figura 36.** Digitalización de la señal obtenida con PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

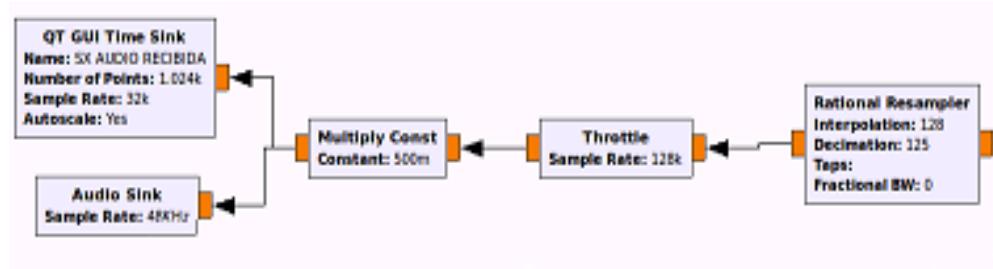
Para la visualización de la constelación es indispensable volver a remuestrear para obtener los puntos adecuados en el diagrama, usando la filtro de ruido cuya valor se encuentra descrito en el anexo de la práctica.



**Figura 37.** Remuestreo para la constelación PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para el tratamiento de la señal analógica se emplea el bloque Rational Resampler el cual permite estandarizar al valor que el USRP N210 puede trabajar, como se muestra en la figura 38.



**Figura 38.** Remuestreador de la señal analógica receptada en PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para más detalle se puede visualizar el Anexo J.

## Práctica N°8

### Tema:

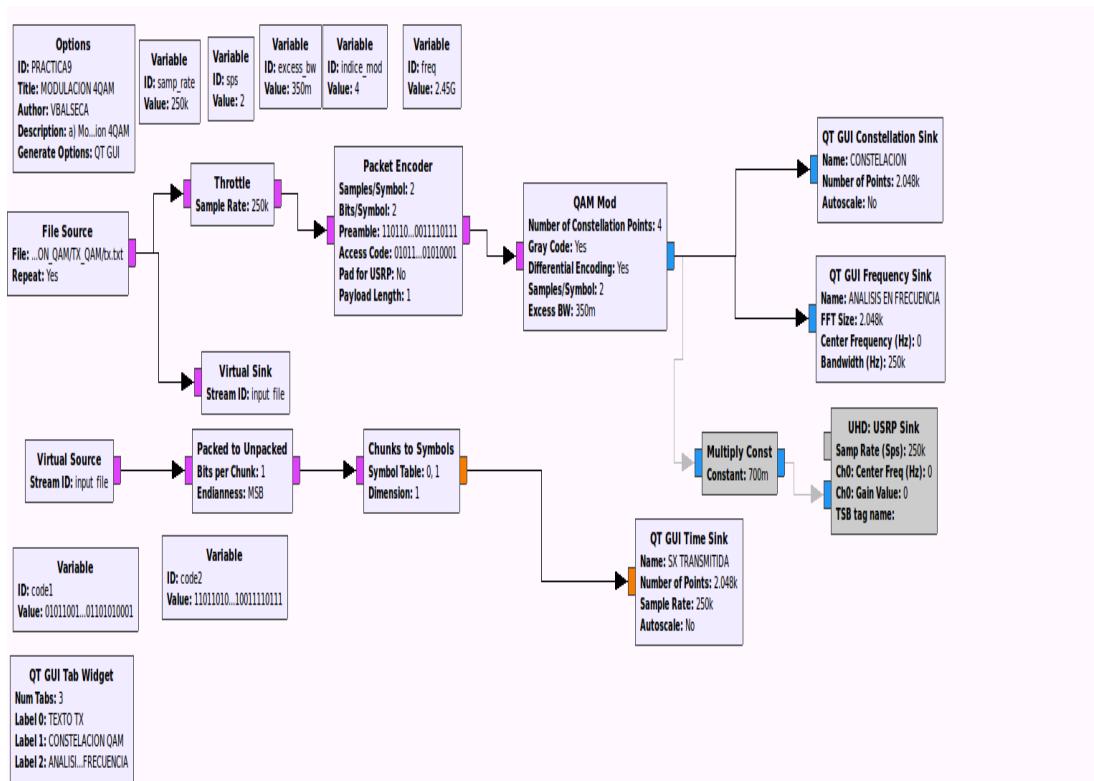
Modulación y demodulación digital 4 QAM.

El objetivo de la práctica es realizar la modulación y demodulación 4QAM utilizando un documento txt como fuente, para ello se emplea los siguientes pasos:

## A) Implementación del esquema de modulación 4 QAM.

### Pasos:

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del modulador 4QAM de la figura 39.



**Figura 39.** Implementación Modulador 4QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Como el tipo de dato a transmitir es un documento de tipo texto que trata con datos tipo Byte no es necesario realizar ningún tipo de digitalización de la señal, en la figura 39 se usa el bloque Packet Encoder para transmitir en tramas con encabezado, código de acceso y preámbulo por ende se procede a efectuar la modulación de manera más rápida, se emplea el modulador QAM señalando el número de constelaciones que se va a emplear y lo transmite.

Las variables que se emplearon son las siguientes:

**Samp\_rate:** Frecuencia de muestreo, valor de 250KHz.

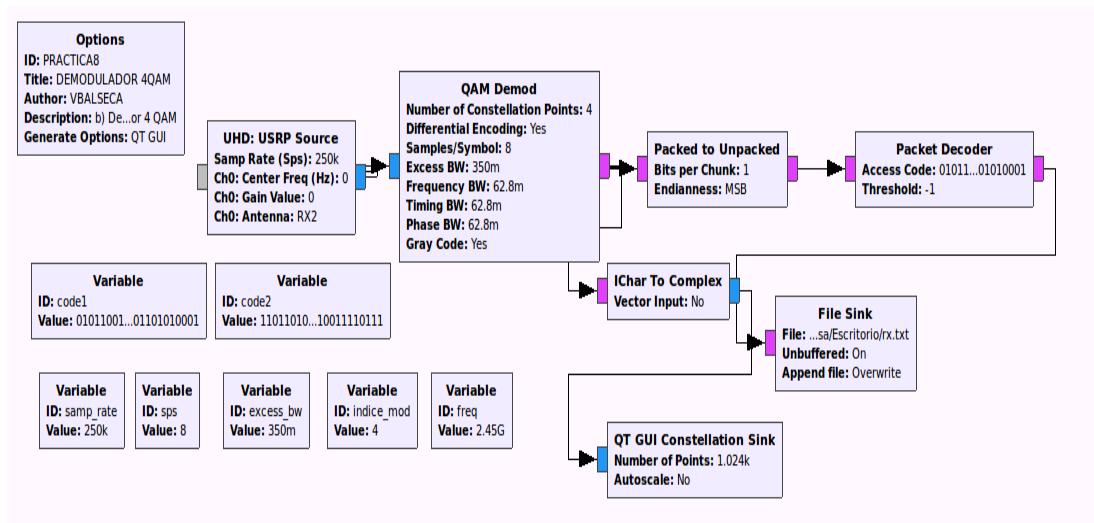
**Sps:** Utilizada para las muestras por símbolo, valor 2.

**Índice\_mod:** Nivel de modulación, valor 4

## B) Implementación del demodulador 4 QAM.

**Pasos:**

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema del demodulador 4QAM de la figura 40.



**Figura 40.** Demodulador 4QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para el demodulador únicamente se invierten los bloques ya que realiza el proceso inverso. Para más detalle se puede visualizar el Anexo K.

## Práctica N°9

**Tema:**

Técnica de reducción de PAPR en OFDM.

En esta práctica se efectúa la técnica de codificación para la reducción del PAPR en OFDM, para ello se emplea un codificador convolucional. Se procede a efectuar los siguientes pasos:

**A) Implementación del esquema de reducción de PAPR en OFDM.**

Para la implementación se tienen los parámetros expuestos en la tabla 22.

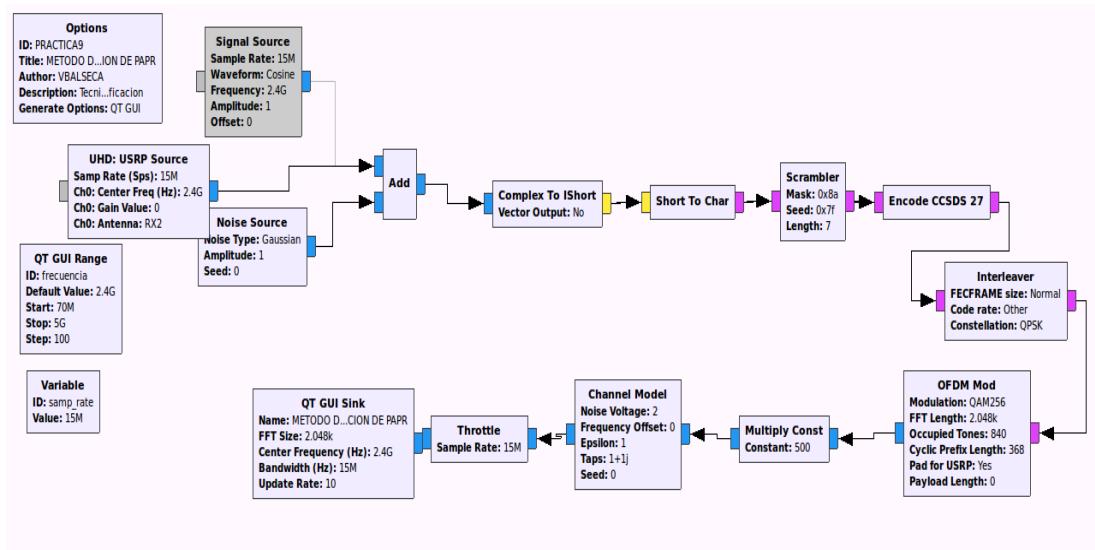
**Tabla 22.** Parámetros para reducción de PAPR.

Parámetros	Valores
<b>Frecuencia de muestreo</b>	15 MHz
<b>Ancho de banda del canal</b>	20 MHz
<b>Fuente de ruido</b>	Gaussiano
<b>FFT</b>	2048
<b>Nº de subportadoras</b>	1440
<b>Nº de portadoras piloto</b>	240
<b>Nº de guarda banda nula de subportadoras</b>	368
<b>Nº de sub-canales</b>	32

**Elaborado por:** Investigadora.

**Pasos**

1. Comunicar GNU Radio y el USRP N210.
2. Implementar el esquema de reducción de PAPR usando un codificador de canal.



**Figura 41.** Esquema de reducción de PAPR usando un codificador de canal.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 41 se usa una fuente desde la UHD USRP Source de la banda de wifi o wimax ingresando una fuente de ruido la cual debe ser transformada de tipo complejo a short y este a su vez a chart para emplear el bloque Scramber el cual se emplea para reducir la longitud de cadenas de 0 y 1 de la señal a transmitir, seguido del bloque Encode CCSDS 27 al cual es un codificador convolucional para proteger la información, el bloque interleaver ayuda a entrelazar la tramas, seguida del modulador OFDM en el cual se puede escoger el tipo de modulación , finalmente el bloque Chanel Model se usa para probar la señal obtenida ya que simula un canal básico.

## Práctica N°10

### Tema:

Red GSM.

El objetivo de esta práctica es desarrollar un prototipo de red GSM, utilizando el proyecto OpenBTS, realizando un plan de marcado que permitió establecer llamadas entre usuarios conectados a esta red, para lo cual se empleó los siguientes pasos:

Se requiere implementar el siguiente esquema de conexión mostrada en la figura 42:



**Figura 42.**Conexión entre GNU Radio y USRP N210.

**Elaborado por:** Investigadora.

Se procede a instalar el proyecto OpenBTS

#### **A) Instalar los prerequisitos de OpenBTS**

Al trabajar con Ubuntu se pueden descargar las siguientes dependencias y librerías.

```
sudo apt-get install software-properties-common python-software-properties
```

#### **B) Instalar de los repositorios Git**

Se empleará los siguientes comandos:

```
sudo add-apt-repository pps:git-core/ppa
```

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install git
```

#### **C) Descargar el código fuente de OpenBTS**

Se procede a clonar el repositorio dev con los siguientes comandos:

```
git clone https://github.com/RangeNetworks/dev.git
```

Se accede al directorio

```
cd ~dev  
./clone.sh  
./switchto.sh master
```

#### **D) Compilar el código**

Se instala el script build.sh para que se ubiquen las herramientas de compilacion y autoconfiguración mediante el siguiente comando:

```
./build.sh N210
```

#### **E) Instalar los componentes de OpenBTS**

Se procede a acceder al siguiente directorio

```
Cd BUILDS/ (archivo)
```

Se instalan los siguientes paquetes:

```
sudo dpkg -i *.deb
```

```
sudo apt-get install -f
```

#### **F) Instalar OsmoTRX**

Es un transceptor de radio definido por software que implementa la capa física, se deben instalar algunas dependencias:

```
sudo apt-get install gnutls-bin
```

```
sudo apt-get install gnutls-dev
```

```
sudo apt-get install build-essential libtool libtalloc-dev shtool autoconf
```

```
automake git-core pkg-config make gcc
```

```
sudo apt-get install libpcsclite-dev
```

#### **Clonar el repositorio libsmocore:**

```
git clone git://git.osmocom.org/libosmocore.git
```

```
cd libosmocore/
```

```
autoreconf -i
```

```
./configure
```

```
Make
```

```
sudo make instal
```

```
sudo ldconfig -i
```

```
cd ..
```

Se instala OsmoTRX

```
cd ~
```

```
git clone https://github.com/osmocom/osmo-trx.git
```

```
cd osmo-trx
```

```
./autogen.sh
```

```
./configure
```

```
Make
```

```
sudo make install
```

## **G) Establecer comunicación entre la PC y el USRP N210**

Se asigna una ip estática dentro de la subred de la USRP N210.

## **H) Alinear las antenas**

En este caso se utilizan las antenas VERT900, pueden ser con alineación en 90° dependiendo de la necesidad del estudiante.

## **I) Inicializar los servicios**

Servicio de mensajería mediante el siguiente comando:

```
sudo /usr/local/sbin/smqueue
```

Servicio de registro y autenticación mediante el siguiente comando:

```
sudo /usr/local/sbin/sipauthserve
```

Servicio de llamadas mediante el siguiente comando:

```
sudo /usr/sbin/asterisk -vvv
```

El transceptor OsmoTRX el mismo que establece comunicación entre OpenBTS y el USRP mediante el siguiente comando:

```
sudo apt-get install osmo-trx -f
```

```
Osmo-trx -f
```

El servicio de OpenBTS mediante los siguientes comandos:

```
cd /OpenBTS
```

```
sudo ./OpenBTS
```

#### **J) Búsqueda del IMSI**

La identificación del terminal móvil se lo puede ejecutar con los siguientes comandos:

```
OpenBTS> config Control.LUR.OpenRegistration ".*"
```

```
OpenBTS> config Control.LUR.SendTMSIs "1"
```

#### **K) Plan de Marcado**

Una vez identificado el terminal asociado se procede a efectuar un plan de macado mediante los siguientes comandos:

```
sudo asterisk -rx "database put IMSI IMSI740000115207815 0987000001"
sudo asterisk -rx "database put PHONENUMBER 0987000001
IMSI740000115207815"
sudo asterisk -rx "database put IMSI IMSI740000120427676 0987000002"
sudo asterisk -rx "database put PHONENUMBER 0987000002
IMSI740000120427676"
```

Se efectua una copia de seguridad del archivo  
*/etc/asterisk/extensions.conf*

En el archivo creado se agrega la siguiente librería

```
#include extensions-custom.conf
```

En el archivo `/etc/asterisk/extensions-custom.conf` se agrega el plan de marcado, expuesto en la figura 43, el cual es un código propio que se genera al usar asterisk.



```
[from-openBTS]
exten => _0987X..1,Verbose(Dialplan started)
same = n,Set(CALLER_IMSI=${CALLERID(num)})
same = n,Verbose(Get CID from CALLER_IMSI: ${CALLER_IMSI})
same = n,Set(CID=${DB(IMSI/${CALLER_IMSI}))})
same = n,Set(CALLERID(num)=${CID})
same = n,Verbose(Get IMSI from EXTEN: ${EXTEN})
same = n,Set(IMSI=${DB(PHONENUMBER/${EXTEN}))})
same = n,dial(SIP/00101100010/${IMSI})
same = n,Hangup
```

**Figura 43.** Plan de marcado.

**Elaborado por:** Investigadora.

## L) Registro de usuarios

Para el registro se emplea el siguiente comando:

```
./nmcli.py sipauthserve subscribers create "Nombre" IMSI <<IMSI>>
<<MSISDN>>
```

## M) Ejecutar las llamadas y mensajes entre los usuarios registrados

Para más detalle se puede visualizar el Anexo L.

### 3.2.4. Verificación de resultados

#### Práctica N°1: Conexión entre GNU Radio y USRP N210

En esta práctica se mostró al estudiante como se establece la comunicación entre el hardware y software de SDR, y la compatibilidad entre los mismos.

El software instalado es GNU Radio en el sistema operativo Ubuntu 16.04 LTE ya que los mismos presentan mayor estabilidad al ser escritos en código abierto las librerías empleadas son más accesibles.

Al instalar en Windows las librerías se descargan incompletas y a su vez no se puede usar los proyectos que nacen de SDR como estaciones GSM, por lo que Ubuntu en distribución LTE es la mejor opción puede ser instalada en una partición del equipo o a su vez en una máquina virtual.

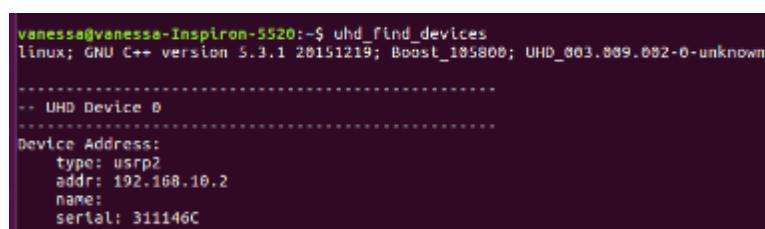
En la figura 42 se puede observar la conexión física de hardware del dispositivo USRP N210, a través del puerto Gigabit Ethernet ya que es un modelo correspondiente a la familia de USRP 2, para ello se debe analizar si la PC tiene un puerto disponible, en este caso se optó por adquirir un adaptador que permitió establecer la comunicación entre hardware y software.

Para establecer comunicación entre el hardware y software se asigna una dirección estática en el ordenador y se puede comprobar la comunicación con los siguientes comandos:

***uhd\_find\_devices***

***uhd\_usrp\_probe***

Los comandos mencionados arrojan información de los dispositivos USRP que se encuentran en la red, además si el controlador se encuentra correctamente instalado, entre otras características del USRP N210, expuestas en las figuras 44 y 45 respectivamente.



```
vanessa@vanessa-Inspiron-5520:~$ uhd_find_devices
linux; GNU C++ version 5.3.1 20151219; Boost_185800; UHD_003.009.002-0-unknown

-----
-- UHD Device 0
-----
Device Address:
  type: usrp2
  addr: 192.168.10.2
  name:
  serial: 311146C
```

**Figura 44.** USRP N210 encontradas en la red.

**Elaborado por:** Investigadora.



```
vanessa@vanessa-inspiron-5520:~$ 
EnvironmentError: OSERR: error in pthread_setschedparam

Device: USRP2 / N-Series Device

Mboard: N210r4
hardware: 2577
mac-addr: 00:00:2f:16:b7:91
ip-addr: 192.168.18.2
subnet: 255.255.255.255
gateway: 255.255.255.255
gpsdo: none
serial: 311146C
FW Version: 12.4
FPGA Version: 11.1

Time sources: none, external, _external_, ntmo
Clock sources: internal, external, ntmo
Sensors: ntmo_locked, ref_locked

RX DSP: 0
Freq range: -58.000 to 58.000 MHz
```

**Figura 45.** Descripción de características técnicas del USRP conectado.

**Elaborado por:** Investigadora.

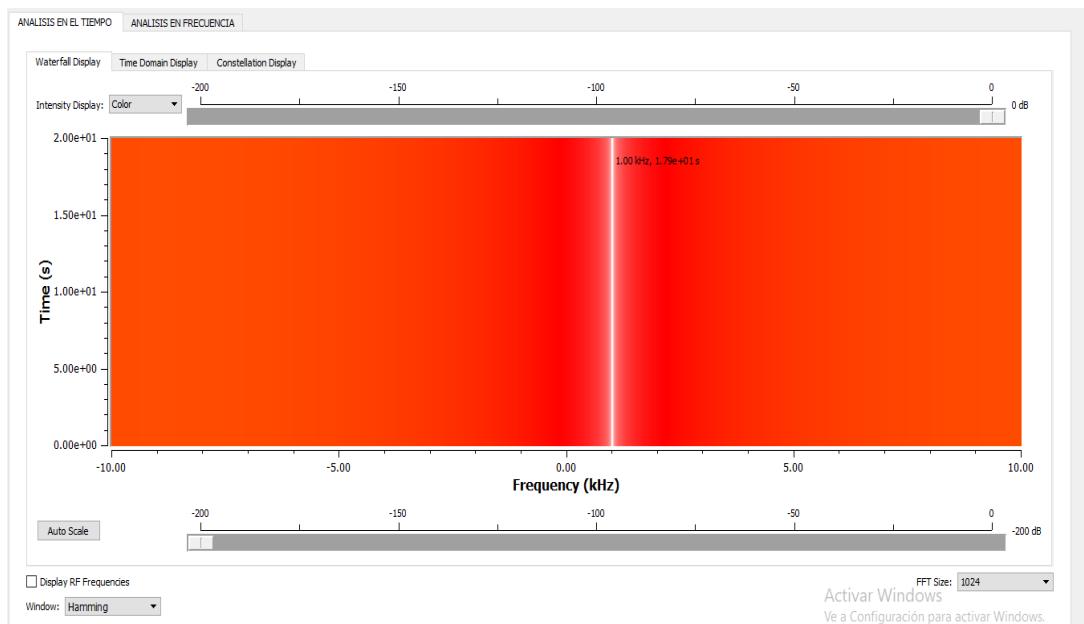
## Práctica N°2: Manejo de herramientas de GNU Radio

La práctica desarrollada tiene dos ítems para el mejor entendimiento de las herramientas de GNU Radio las mismas que arrojan los siguientes resultados:

### A) Generación y análisis de ondas.

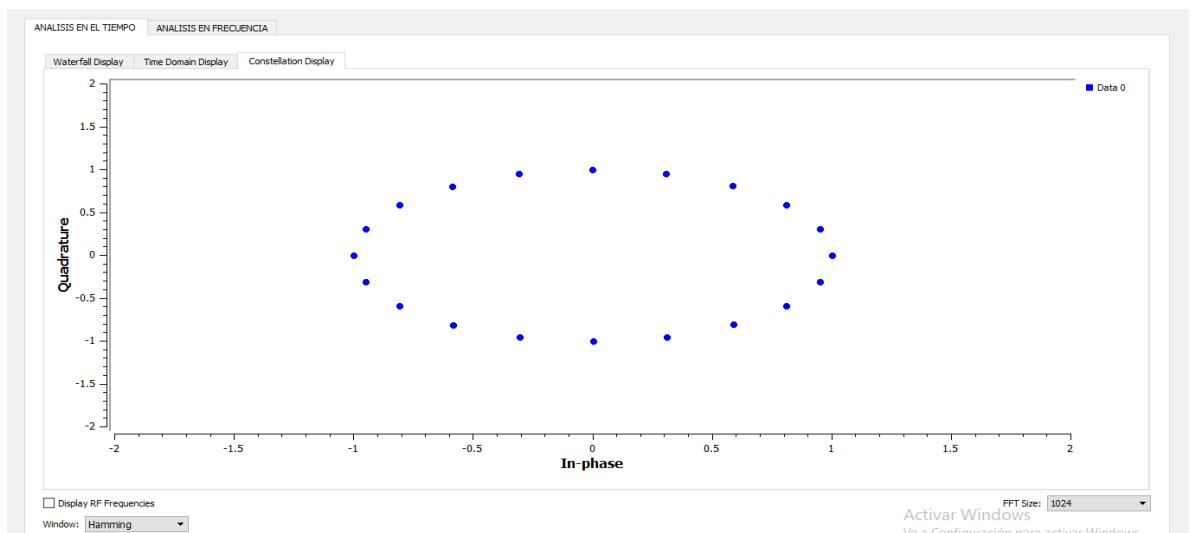
Para la generación de las señales el factor más importante es la frecuencia, en este caso se empleó una frecuencia de 1KHz y una frecuencia de muestreo de 20KHz cumpliendo así el Teorema de Nyquist, las señales pueden tener la forma de coseno, seno, diente de sierra, cuadrada entre otras, además como fuente se puede usar el bloque de File WAV Source la cual emplea en otras prácticas desarrolladas, para que no se consuma todos los recursos de la PC se usa el Throttle la misma que debe tener el mismo valor de la frecuencia de muestreo para que no se exceda las muestras, como sumidero se puede hacer uso de dos aplicaciones tanto las desarrolladas con QT GUI o WX GUI, eso queda a elección del estudiante.

Los resultados de la señal analizados con QT GUI se observan en la figura 46 en donde se puede visualizar un espectrograma con la frecuencia correspondiente de 1 KHz el cual es correcto ya que se generó con ese valor de frecuencia, además permite obtener una constelación de la señal generada la misma se puede observar en la figura 47.



**Figura 46.** Espectro de la señal con QT GUI.

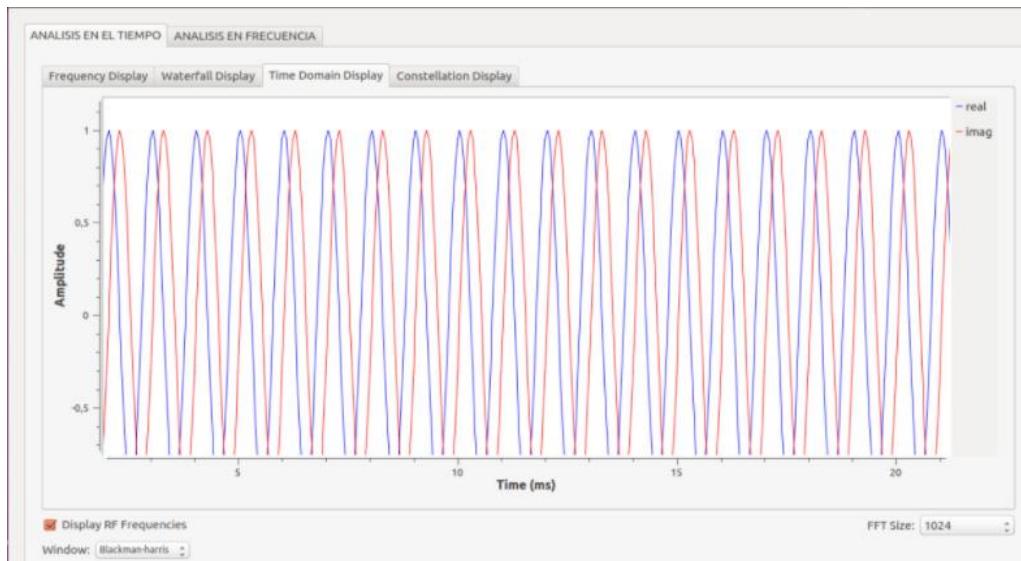
Elaborado por: Investigadora.



**Figura 47.** Constelación de la señal con QT GUI.

Elaborado por: Investigadora.

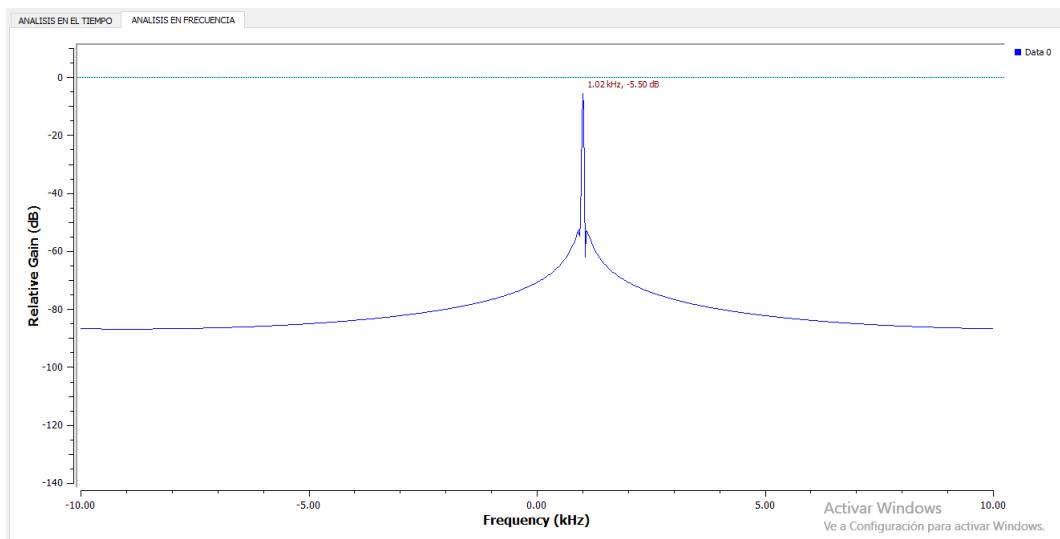
La figura 48 muestra la señal cosenoide de amplitud 1 descompuesta en parte real e imaginaria según las opciones de GNU Radio.



**Figura 48.** Análisis en tiempo con QT GUI.

**Elaborado por:** Investigadora.

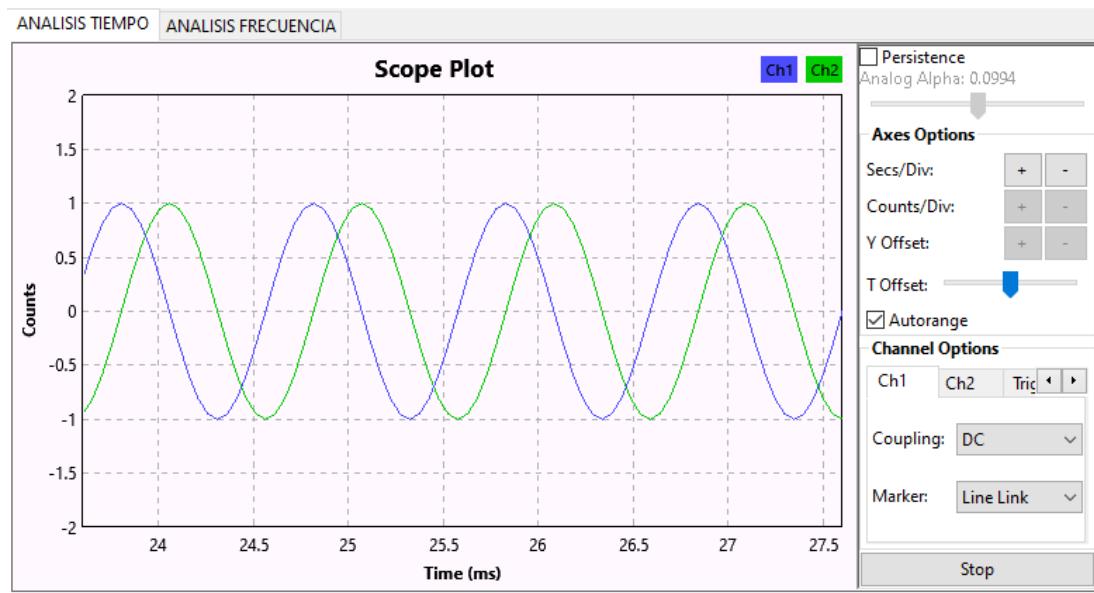
En la figura 49 se observa el análisis de la señal en frecuencia el cual muestra una frecuencia central de 1 KHz correspondiente al parámetro configurado, además con una ganancia de -5,50 dB.



**Figura 49.** Análisis en frecuencia con QT GUI.

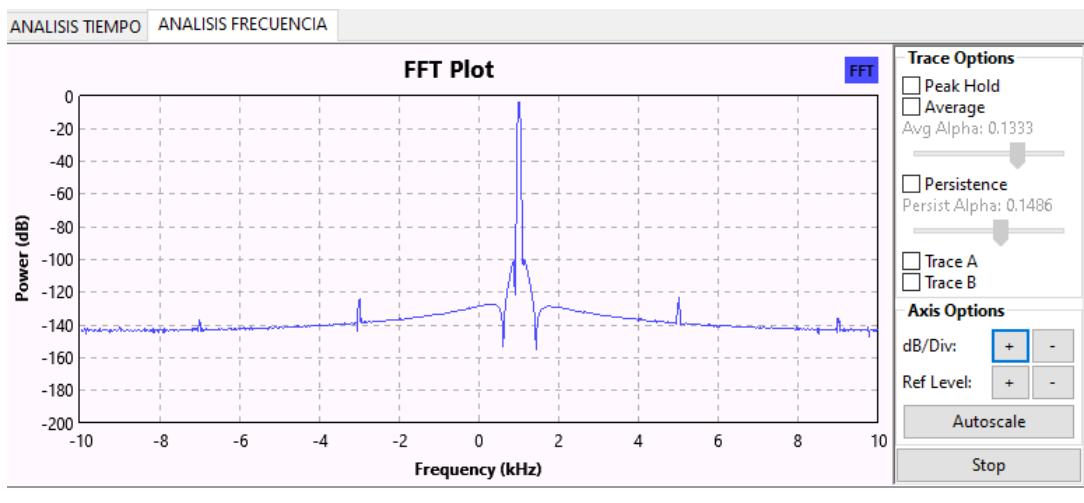
**Elaborado por:** Investigadora.

Para el análisis en tiempo y frecuencia mediante WX GUI se establece que los valores son correctos ya que muestran una amplitud de 1, con frecuencia correspondiente a 1 KHz, los cuales se muestran en las figuras 50 y 51.



**Figura 50.** Análisis en tiempo con WX GUI.

Elaborado por: Investigadora.



**Figura 51.** Análisis en frecuencia con WX GUI.

Elaborado por: Investigadora.

## A) Analizador de Espectros

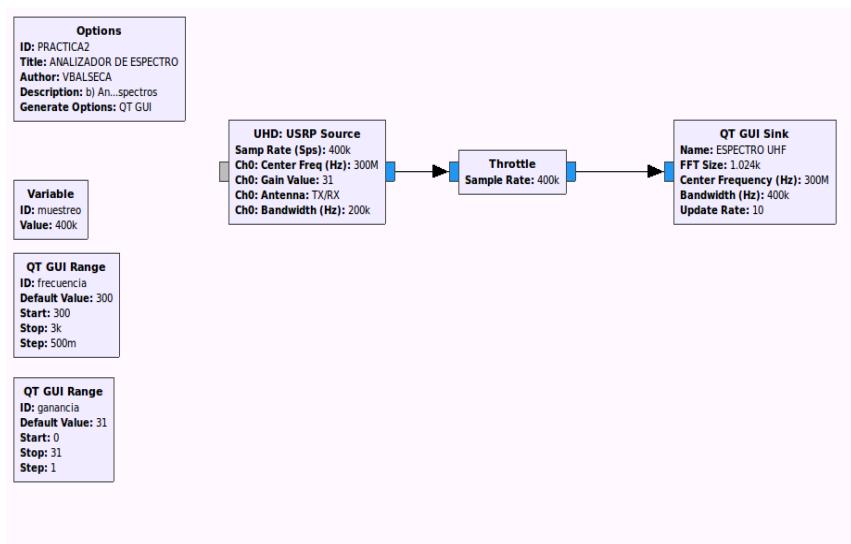
El espectro que se analizó está en el rango de UHF por lo que se toma en cuenta la tabla 23 en la cual se muestra la canalización de las bandas de radiodifusión de televisión abierta para verificar el ancho de banda del canal de audio.

**Tabla 23.** Canalización de las bandas de radiodifusión de televisión abierta. [41]

CANAL	RANGO DE FRECUENCIAS (MHz)	PORTADORA DE VIDEO (MHz)	PORTADORA DE AUDIO (MHz)
14	470-476	471.25	475.75
15	476-482	477.25	481.75
21	512-518	513.25	517.75
22	518-524	519.25	523.75
23	524-530	525.25	529.75
24	530-536	531.25	535.75
25	536-542	537.25	541.75
26	542-548	543.25	547.75
27	548-554	549.25	553.75
28	554-560	555.25	559.75
29	560-566	561.25	565.75
30	566-572	567.25	571.75
31	572-578	573.25	577.75
32	578-584	579.25	583.75
33	584-590	585.25	589.75
34	590-596	591.25	595.75
35	596-602	597.25	601.75
36	602-608	603.25	607.75
38	614-620	615.25	619.75
39	620-626	621.25	625.75
40	626-632	627.25	631.75
41	632-638	633.25	637.75
42	638-644	639.25	643.75
43	644-650	645.25	649.75
44	650-656	651.25	655.75
45	656-662	657.25	661.75
46	662-668	663.25	667.75
47	668-674	669.25	673.75

48	674-680	675.25	679.75
49	680-686	681.25	685.75
50	686-692	687.25	691.75
51	692-698	693.25	697.75

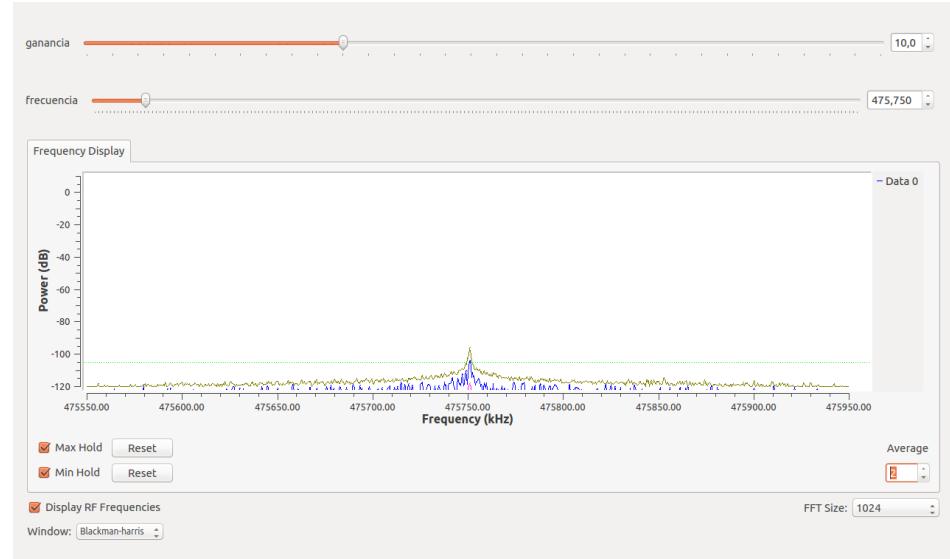
En la figura 52, se observa el esquema del analizador de espectros de UHF el mismo que comprende los rangos de frecuencia de 300MHz a 3GHz.



**Figura 52.** Analizador de espectros UHF.

**Elaborado por:** Investigadora.

Tomando en cuenta la tabla 23 se pudo escoger una subportadora de audio con la frecuencia de 475.75 MHz, cuyo resultado está expuesto en la figura a 53 en la que se observa que el espectro se presenta hasta 475.85 MHz con dando como resultado un ancho de banda de 100KHz, por ende, el resultado es correcto ya que el máximo de ancho de banda seria 130KHz.

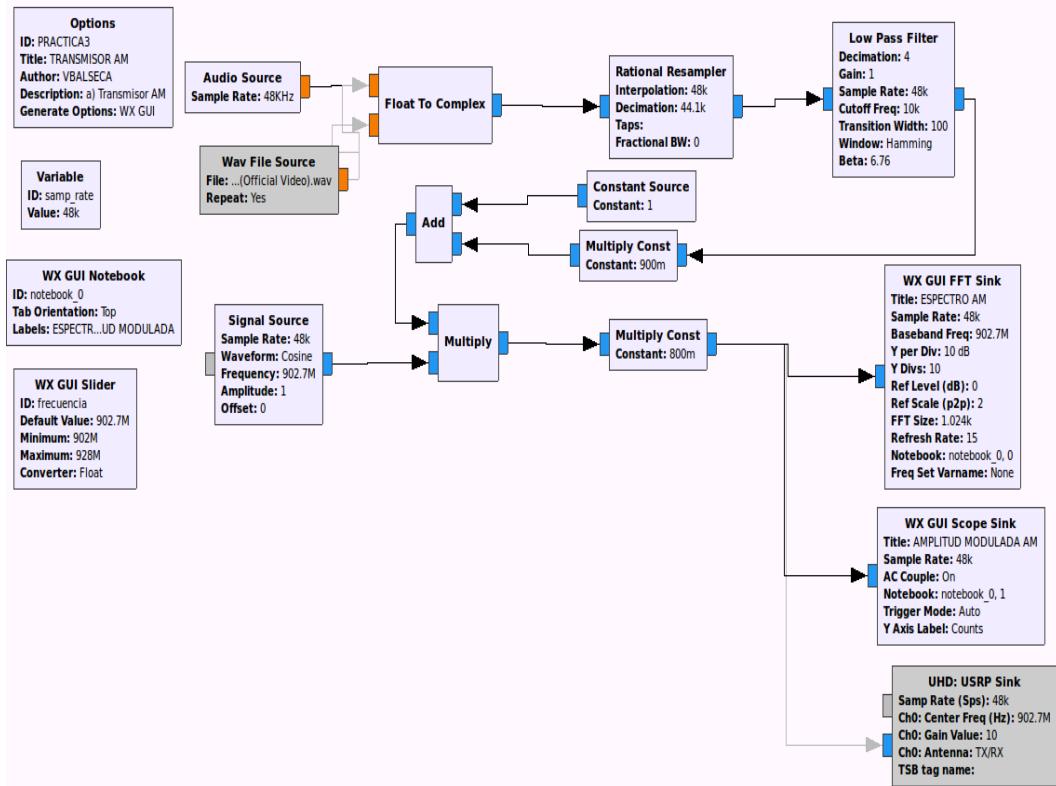


**Figura 53.** Resultado del analizador de espectros.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Práctica N° 3: Transmisor y receptor AM

Con la finalidad de que el estudiante pueda verificar como se produce la modulación AM se efectúa un transmisor, el audio que se divulga es proveniente de la tarjeta de audio de la PC, al efectuar un tratamiento con la señal se observa las gráficas tanto en tiempo como en frecuencia, además se resalta la importancia de la decimación e interpolación, en la figura 54 se puede observar el esquema implementado.

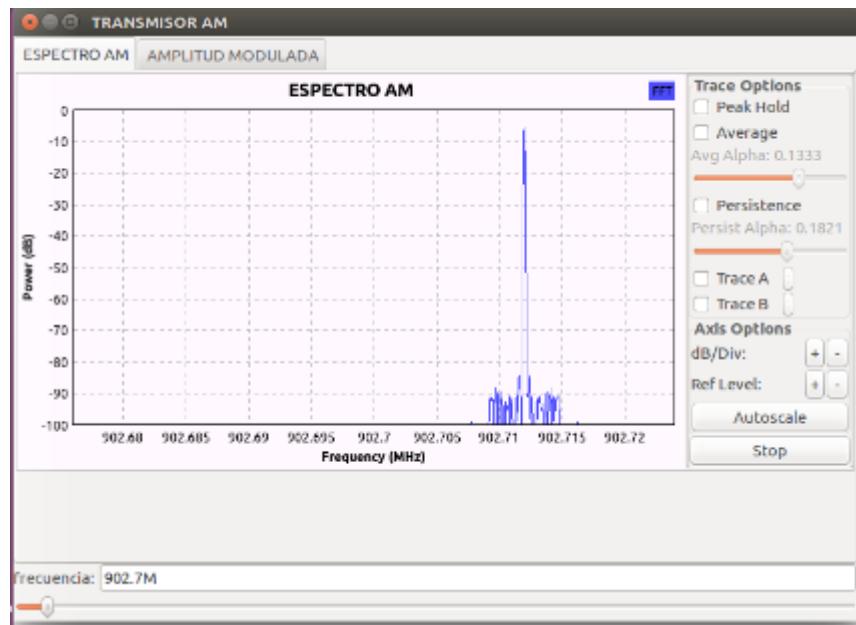


**Figura 54.** Implementación del transmisor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

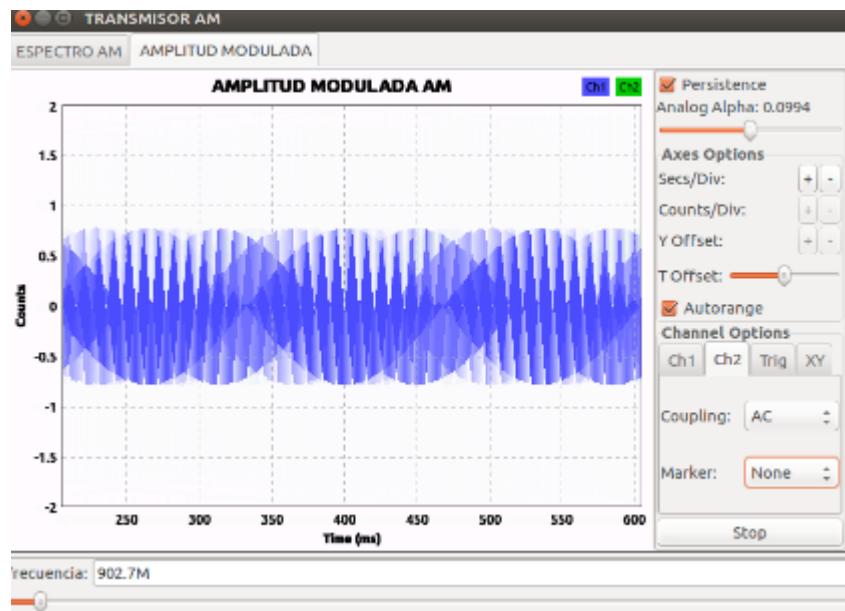
La frecuencia en la que se va a trabajar es de 902 MHz a 928 MHz, para ello se emplea dos señales una obtenida desde la tarjeta de sonido de la PC y otra señal generada, se necesita un muestreador racional, para ello se debe transformar un dato flotante a complejo, se filtra las frecuencias por medio del filtro pasa bajo, y se efectuó operaciones entre las dos señales para poder transmitir la señal en AM, al operar el USRP en frecuencias más altas se pondrá en funcionamiento en forma de simulación y se verifica la calidad del transmisor AM en siguiente práctica.

Como se puede observar en la figura 55 y 56 se verifica la modulación y transmisión AM, ya que el USRP trabaja en frecuencias altas se tomó de referencia las frecuencias antes expuestas, en la transmisión de la señal se debe tener cuidado de interferencia ya que la modulación AM es sensible a picos de potencia, por lo que se optó por utilizar un remuestreador.



**Figura 55.** Resultado de la Transmisión AM.

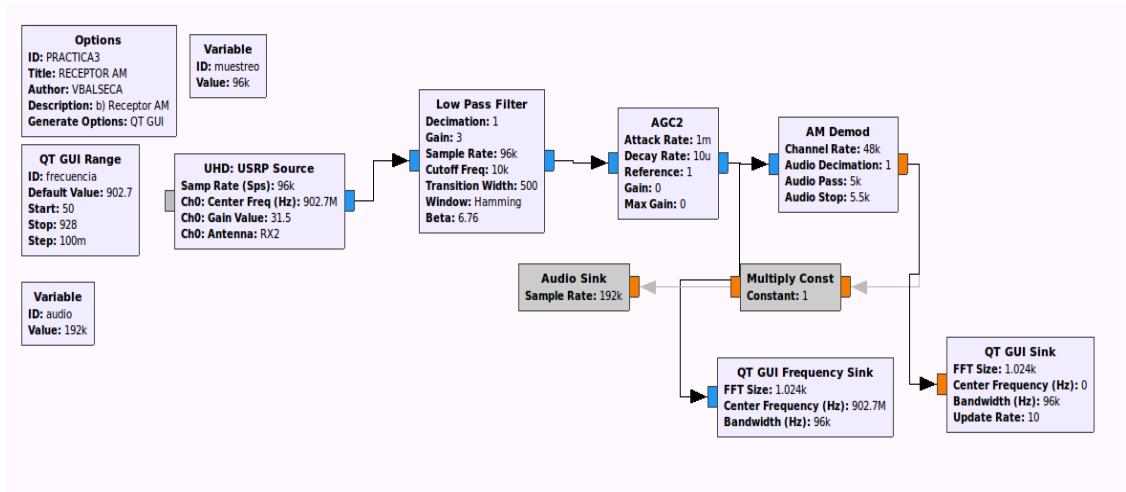
Elaborado por: Investigadora.



**Figura 56.** Modulación AM.

Elaborado por: Investigadora.

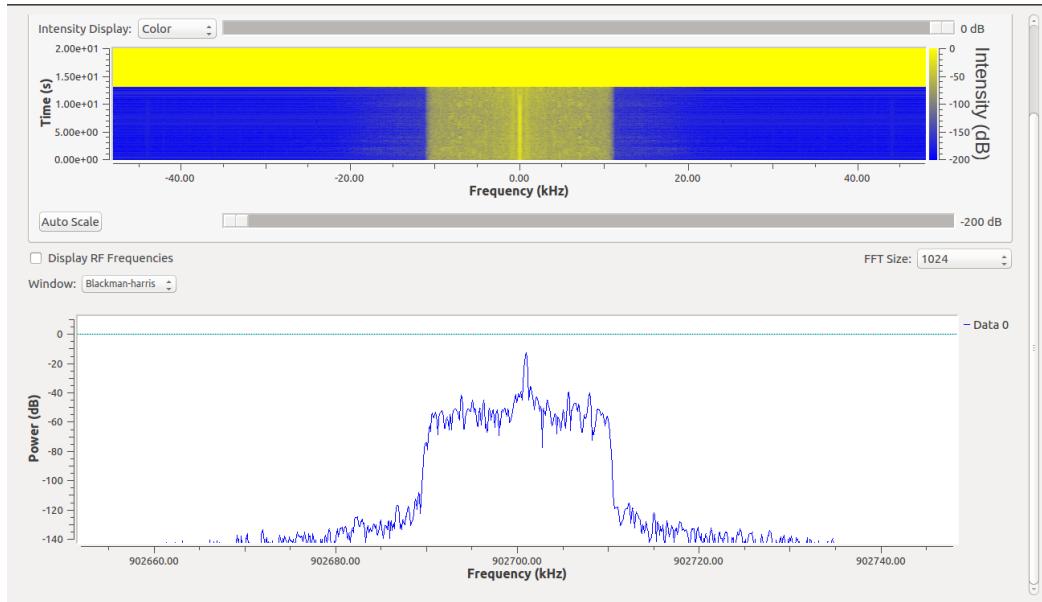
El receptor implementado se puede observar en la figura 57 en la misma que se efectuó la demodulación de la señal AM en un rango de frecuencias de 902 a 928 MHz, teniendo en cuenta que para ello la amplitud de la señal no debe sufrir ninguna alteración para que la información no sea distorsionada, en frecuencias más altas la señal sufre daños.



**Figura 57.** Implementación del receptor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

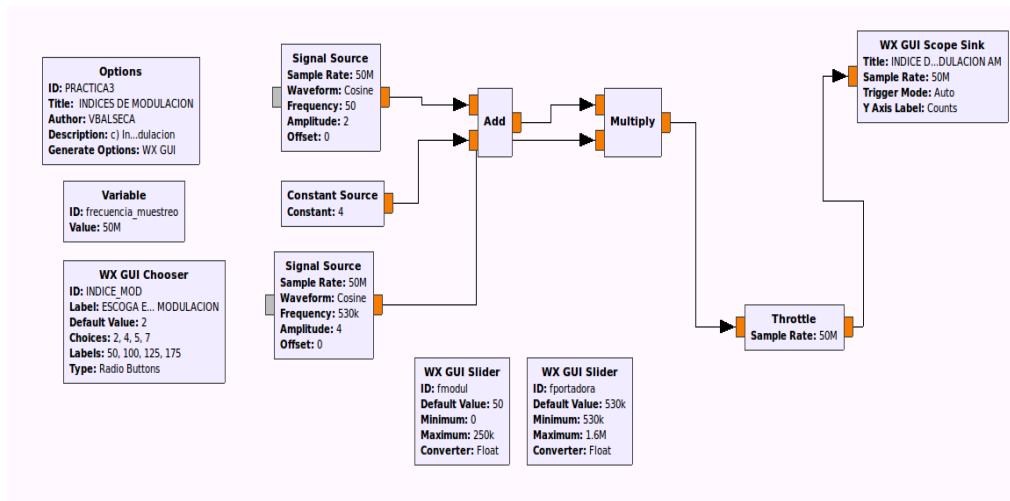
En la figura 58 se observa el resultado del receptor AM, el mismo que para comprobar su funcionamiento se emplea el transmisor descrito en el ítem anterior, la frecuencia en la que en esta receptando la señal es de 902,7 MHz, para la compensación de un remuestreador se optó por aumentar la tasa de muestro del audio, además las herramientas de GNU radio permiten observar el espectro de la señal.



**Figura 58.** Resultado del receptor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Se propone un literal b) para poder analizar los índices de modulación expuesta en la figura 59.

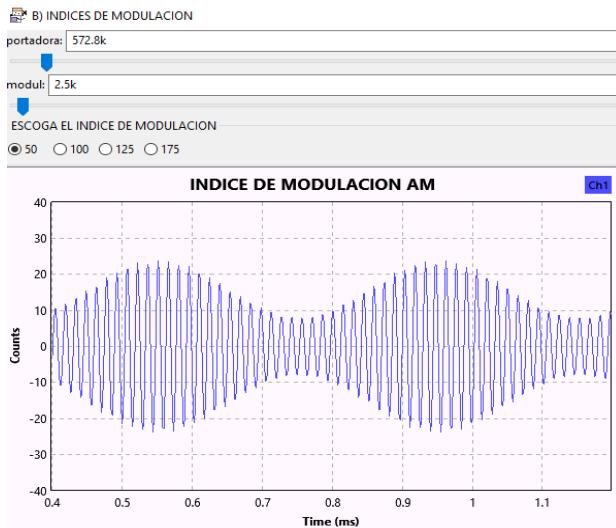


**Figura 59.** Esquema para índices de modulación.

**Elaborado por:** Investigadora.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para la modulación con índice 50%, 100% ,125%, 175%.

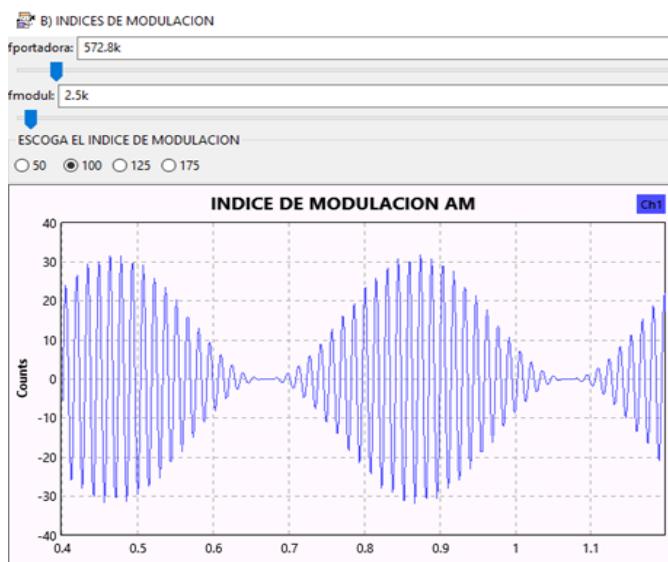
En la figura 60 se muestra los resultados de la modulación al 50 %, en donde la amplitud de la portadora varia un 50% por encima y por abajo de su amplitud original.



**Figura 60.** Modulación al 50%.

**Elaborado por:** Investigadora

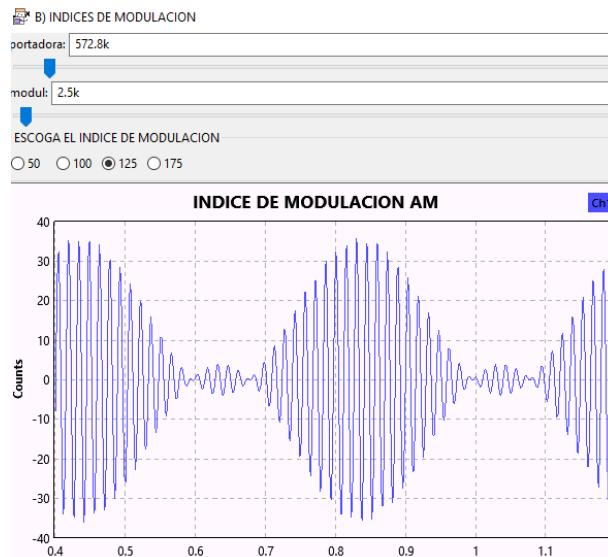
En la figura 61 se muestra los resultados de la modulación al 100 %, para evitar la distorsión, no se debe exceder del 100%.



**Figura 61.** Modulación al 100%.

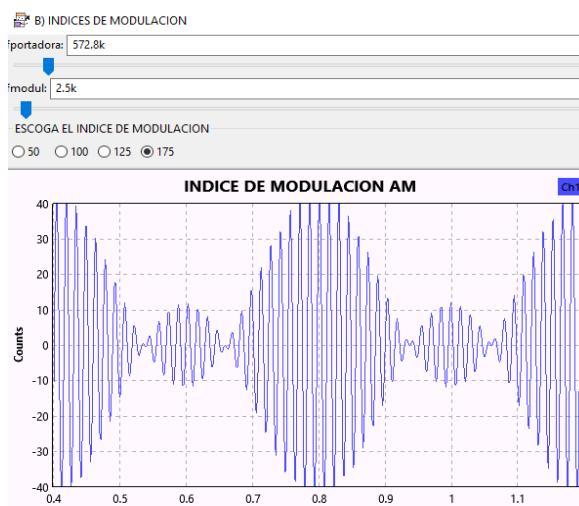
**Elaborado por:** Investigadora.

La modulación al 125 % y al 175 % se muestra en las figuras 62 y 63, donde se presenta la sobre modulación y la señal comienza a distorsionarse cambiando la envolvente a un valor pico de 35 en su valor de amplitud.



**Figura 62.** Modulación al 125%.

**Elaborado por:** Investigadora.



**Figura 63.** Modulación al 175%.

**Elaborado por:** Investigadora.

## Práctica N°4: Inhibidor de Señales

Mediante la siguiente práctica se mostró al estudiante como afecta el ruido a una señal receptada, además de interactuar con los diferentes bloques que presenta GNU Radio, en la figura 64 se presenta el esquema implementado:

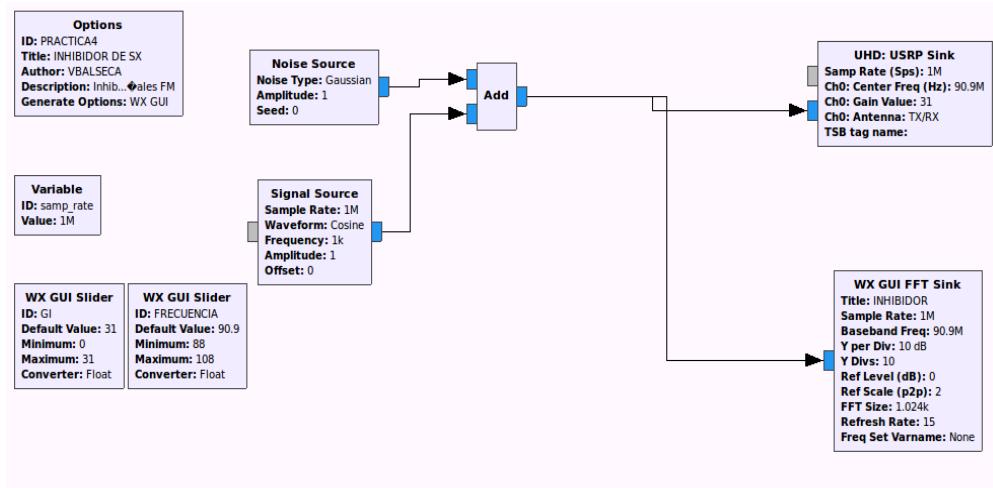
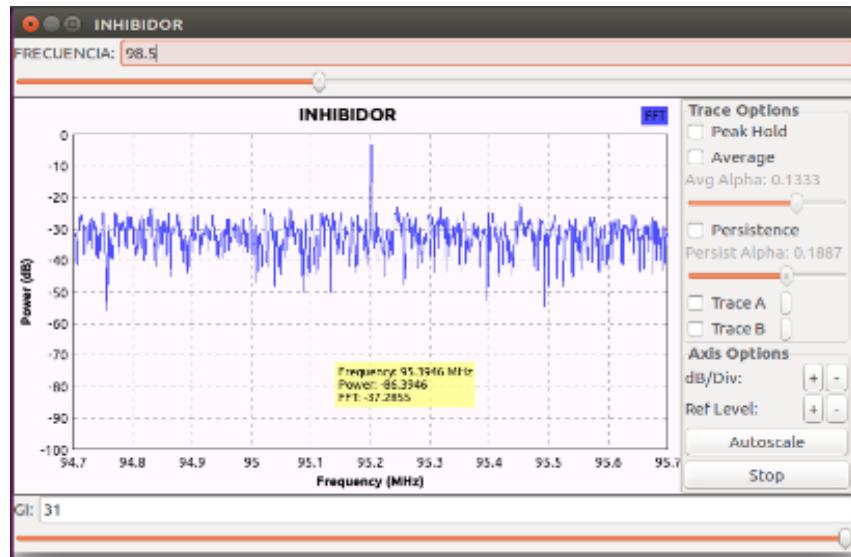


Figura 64. Implementación del inhibidor de señales.

Elaborado por: Investigadora.

El rango de frecuencias utilizadas es de 88 a 108 MHz, para comprobar el correcto funcionamiento se emplea un receptor de FM, al poner en marcha el sistema con el slider se indica la emisora a la cual se va a introducir la señal indeseada, el bloque UHD USRP Sink permite la transmisión de dicha señal, para que la misma tenga impacto en la frecuencia que se interfiere se debe ajustar la ganancia de la antena, la figura 65 muestra resultado de la señal atenuada para una emisora FM de la ciudad cuya frecuencia es 98,5 MHz, en la cual se inserta una señal de ruido impidiendo que la información pueda llegar de manera correcta al receptor.

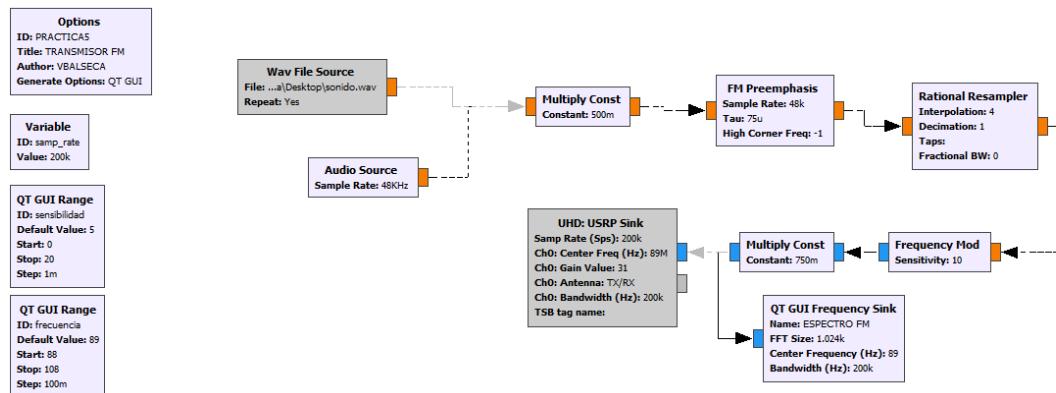


**Figura 65.** Resultado del inhibidor de señales.

**Elaborado por:** Investigadora.

## Práctica N°5: Transmisor y receptor FM

Por medio de la siguiente práctica el estudiante pudo efectuar un transmisor y receptor FM, empleando diversos elementos del software GNU Radio, además se analizó las formas de ondas que se produce y la importancia de la sensibilidad en la transmisión, en la figura 66 se presenta la implementación del transmisor FM.

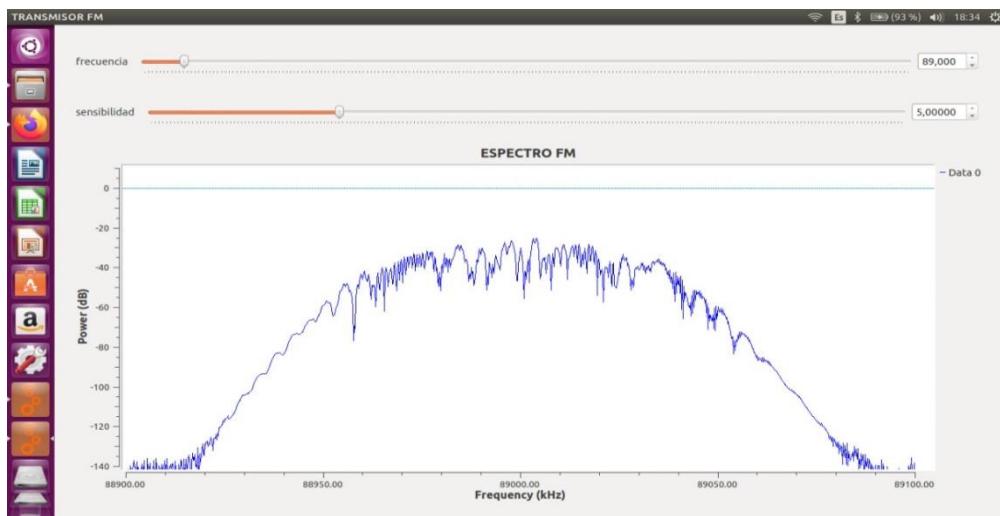


**Figura 66.** Implementación del transmisor FM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Se emplea una fuente de audio cuya amplitud debe ser reducida para que no presente picos indeseables, el uso de FM Preemphasis ayuda a reducir el ruido de altas frecuencias, en este caso es 75u ocupado como estándar en transmisiones FM, el bloque Frequency Mod es un bloque modulador para la obtención de la señal, finalmente para la visualización y análisis de las formas de ondas se utilizó QT GUI.

Se puede observar en la figura 67 los resultados de la transmisión FM, la misma que se transmitió en la frecuencia de 89 MHz la misma que empleó un audio obtenido por el bloque de GNU Radio, además se puede usar el micrófono del PC como fuente de audio, la sensibilidad usada es de 5 para que la transmisión sea nítida.

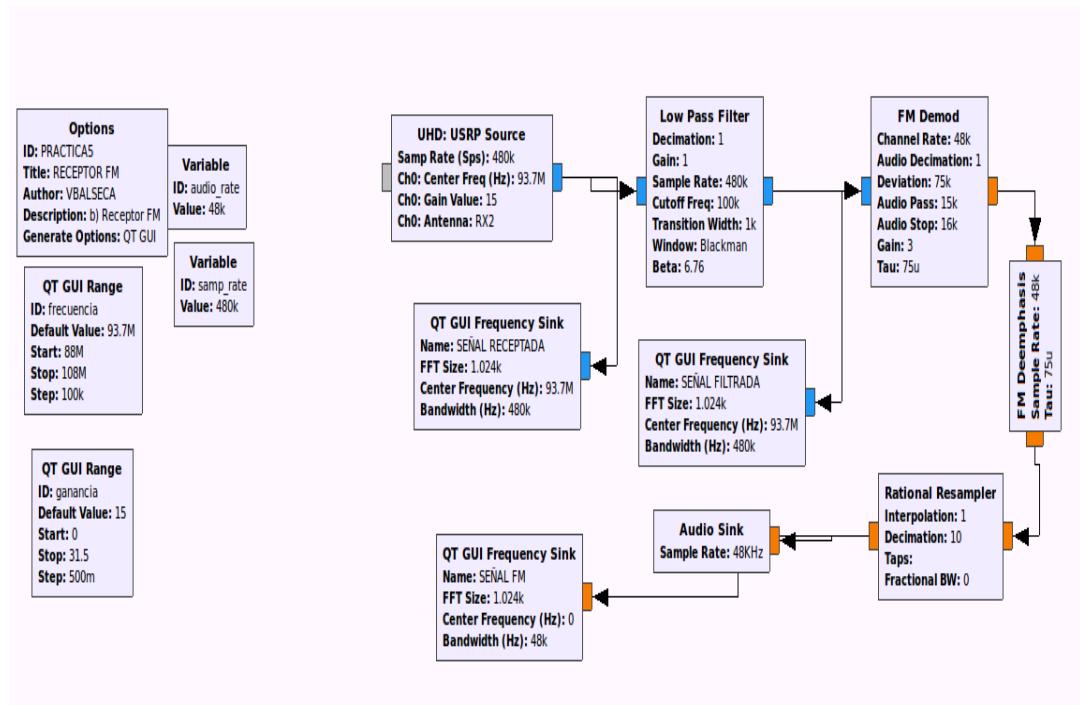


**Figura 67.** Resultado del transmisor AM.

**Elaborado por:** Investigadora.

El receptor FM tiene como finalidad dar a conocer al estudiante como se efectúan las etapas para la demodulación de una señal FM, se usa la banda comercial de FM existente la cual va desde 88 a 108 MHz, para ello se sintonizará una frecuencia que opere dentro de la ciudad, en la figura 68 se presentan las etapas como la recepción de la señal mediante el módulo de UHD, la misma que es tratada para que pueda ser escuchada sin ninguna alteración para ello se emplea un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte de 100KHz , banda de transición de 1 KHz, un demodulador de FM con una desviación de 75 KHz puesto que este valor es definido para sistemas

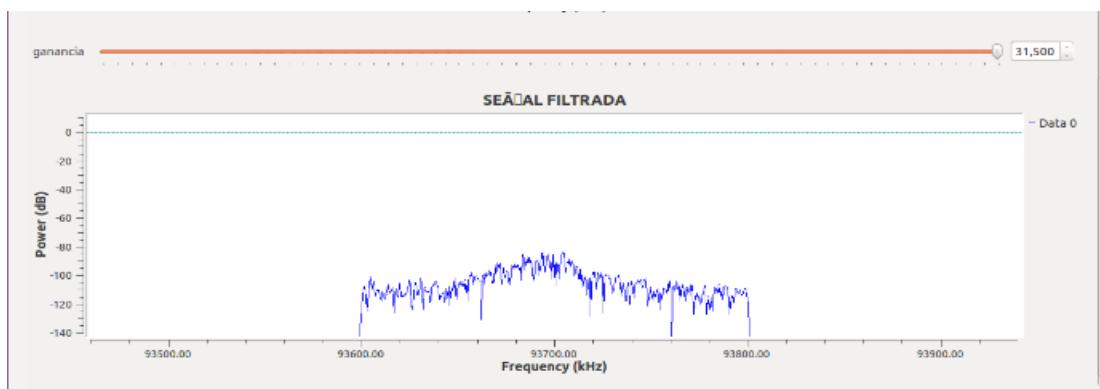
FM, se usa una frecuencia de muestreo de 480 KHz para no utilizar el bloque de remuestreo ya que la decimación tiene un valor de 10.



**Figura 68.** Implementación del receptor FM.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 69, se observa la señal resultante cuya frecuencia de operación es 93.7 MHz, la misma que tiene un ancho de banda de 200 KHz, dando como resultado una transmisión eficiente, ya que en la normativa se especifica un ancho de banda de 220 KHz.

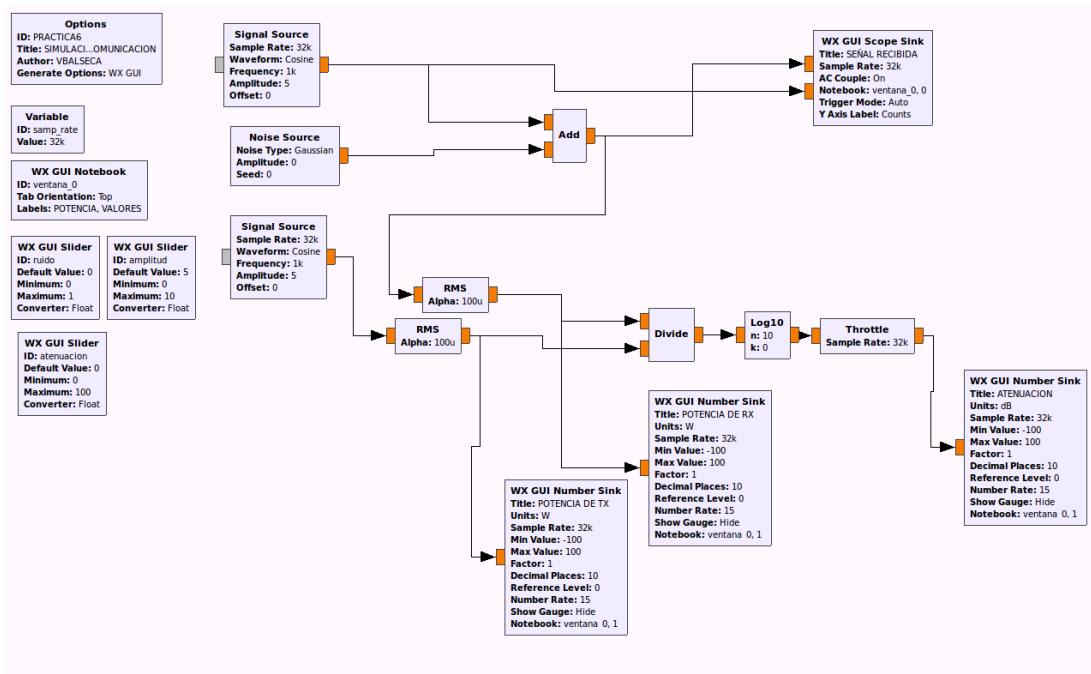


**Figura 69.** Resultado del Receptor FM.

**Elaborado por:** Investigadora.

## Práctica N°6: Perturbaciones de la Señal

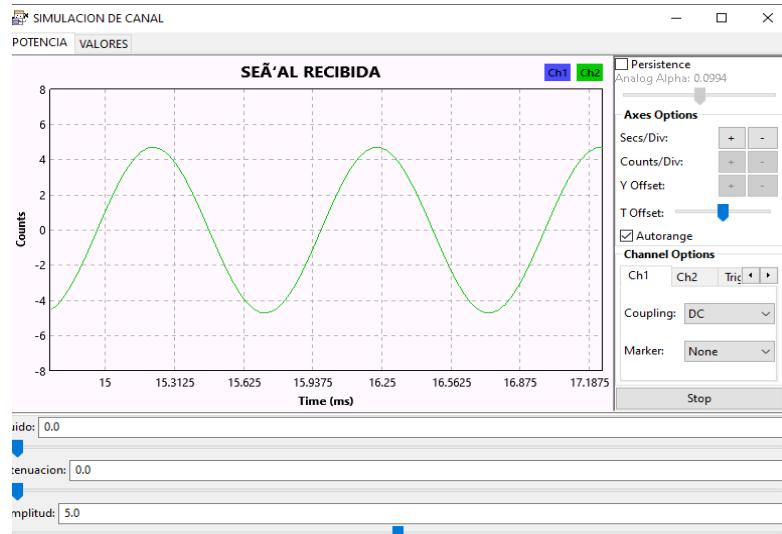
La presente práctica permitió al estudiante conocer las alteraciones que se presentan en la señal que se desea transmitir, ya que se introduce una fuente de ruido de tipo gaussiano, y fuentes proporcionadas por GNU Radio, además se mostró el cálculo de la potencia tanto de transmisión como recepción, así como la atenuación para ello se emplea los bloques de GNU Radio RMS y Log y bloques matemáticos, adicional para mostrar los resultados se hizo uso del bloque WX GUI Number Sink el cual permitió visualizar los datos numéricos, que se detallan a continuación en la figura 70.



**Figura 70.** Simulación del canal de comunicaciones.

**Elaborado por:** Investigadora.

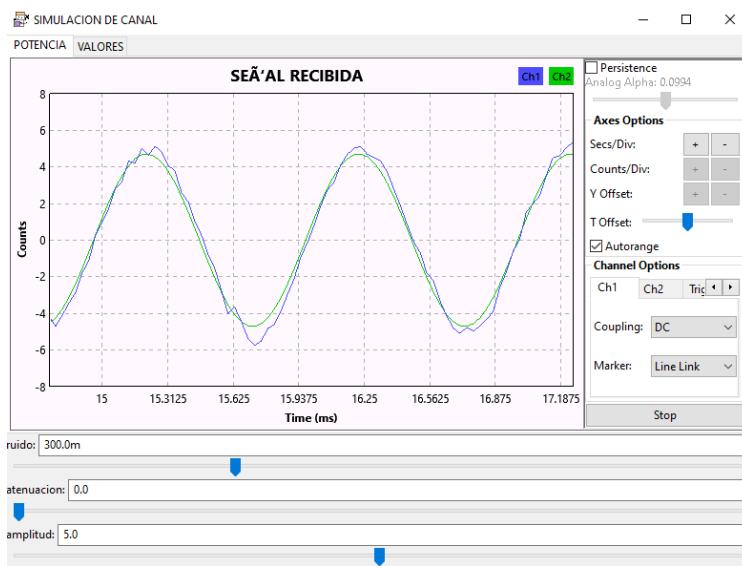
En los resultados de la figura 71 se observa la señal sin alteración la cual es una señal pura, sin ninguna presencia de ruido o distorsión, presentando una amplitud de 5.



**Figura 71.** Señal sin alteración.

**Elaborado por:** Investigadora.

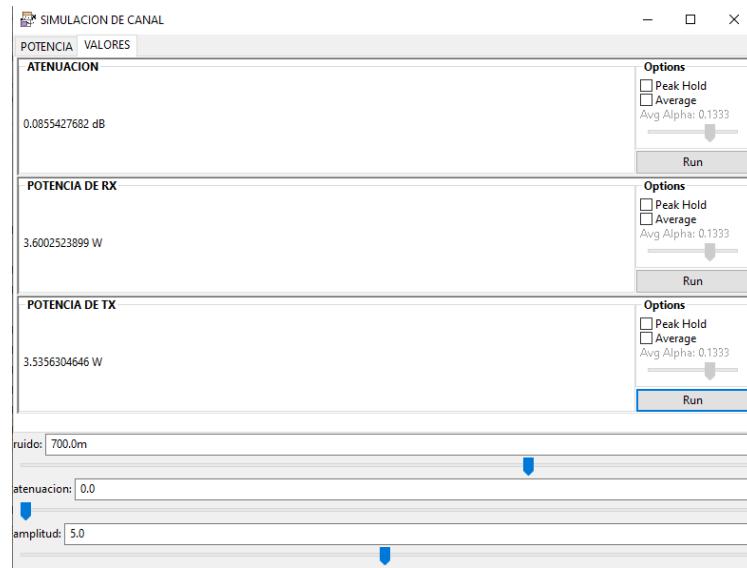
En la figura 72, se observa el resultado de como al introducir ruido en la señal transmitida la misma presenta alteración en su forma de onda (señalada con color azul).



**Figura 72.** Señal con ruido.

**Elaborado por:** Investigadora.

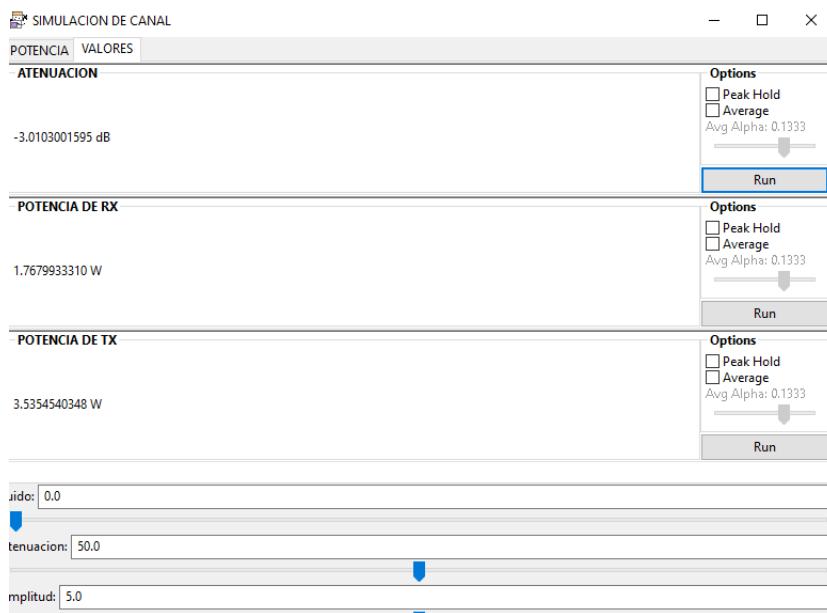
Los resultados de la señal con ruido con una amplitud de 700 milímetros arrojan un valor mínimo de 0,085 como se muestra en la figura 73.



**Figura 73.** Valores de potencia RX y Tx con 700m de ruido de amplitud.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la gráfica 74 se muestra el valor de potencia con la que se recepta la señal con una atenuación del 50 %:



**Figura 74.** Valores de potencia RX y Tx con atenuación del 50 %.

**Elaborado por:** Investigadora.

Al efectuar el cálculo con la fórmula de la atenuación se puede verificar que el valor obtenido es correcto:

$$\text{Atenuacion}_{\text{dB}} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

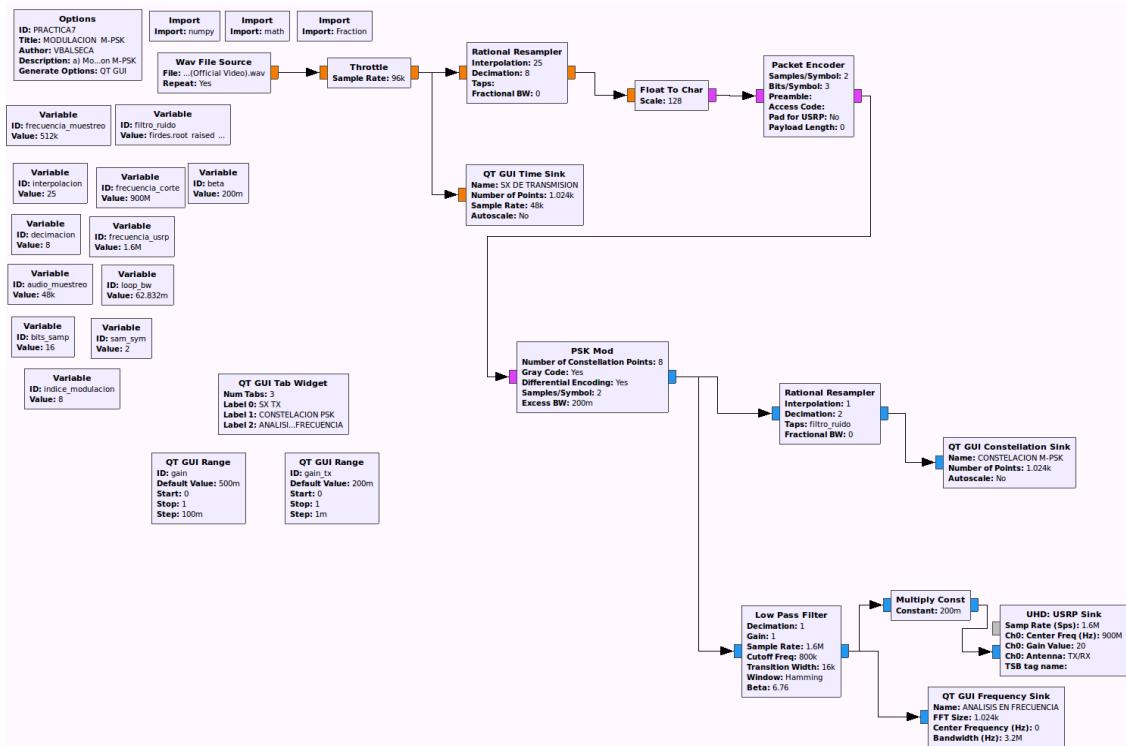
$$\text{Atenuacion}_{\text{dB}} = 10 \log \left( \frac{1.7679933310}{3.5354540348} \right)$$

$$\text{Atenuacion}_{\text{dB}} = 10 \log(0.500075326)$$

$$\text{Atenuacion}_{\text{dB}} = -3.009645727$$

## Práctica N°7: Modulación y Demodulación Digital M-PSK

Mediante las diversas prácticas de modulaciones y demodulaciones digitales el estudiante podrá analizar los parámetros de cada una de ellas a continuación se expone un modulador M-PSK para ello se empleó bloques como fuente de audio, muestreadores, codificadores de paquetes, modulador PSK, fuentes, sumideros entre otros. En la figura 75 se muestra el esquema implementado para el modulador:



**Figura 75.** Modulador M- PSK.

Elaborado por: Investigadora.

Para la implementación del modulador, se debe importar las siguientes librerías:

- *import numpy*
- *import math*
- *from fractions import Fraction*

A continuación, se muestra los diversos índices de modulación implementados, representados en frecuencia y constelación:

### **MODULACIÓN M: 2**

La expresión matemática de la modulación M-PSK está dada por:

$$S_m(t) = g(t) \cos(2\pi f_c t + \vartheta_m)$$

Donde  $\vartheta_m$  representa las diversas fases:

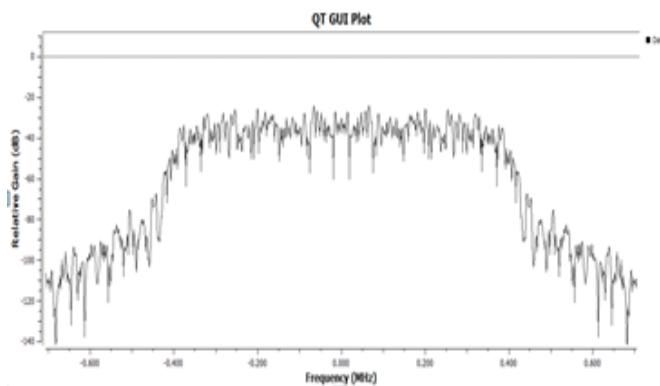
Calculo de fases de la modulación BPSK:

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{m - 1}{M} \right)$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{1 - 1}{2} \right) = 0$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{2 - 1}{2} \right) = \pi$$

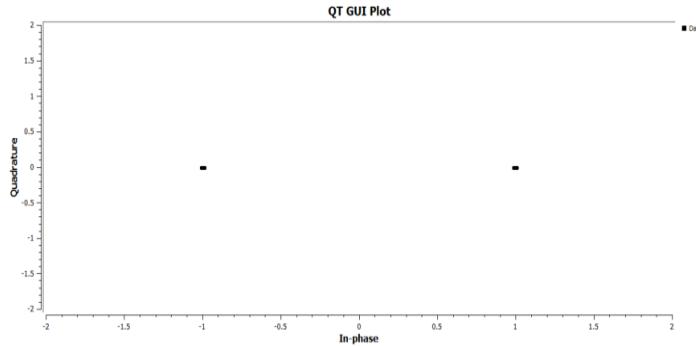
En la figura 76 se observan el resultado del BPSK en frecuencia, el cual se tiene una ganancia relativa -20dB con una ancho de banda 2 MHz.



**Figura 76.** Respuesta de frecuencia con M: 2

**Elaborado por:** Investigadora.

Los resultados de la constelación que se muestran en la figura 77 son correctos ya se muestran dos fases al ser BPSK, estos utilizan codificación Grey para la diferenciación de un bit.



**Figura 77.** Constelación BPSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

### **MODULACIÓN M: 4**

Cálculo de fases de la modulación QPSK:

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{m-1}{M} \right)$$

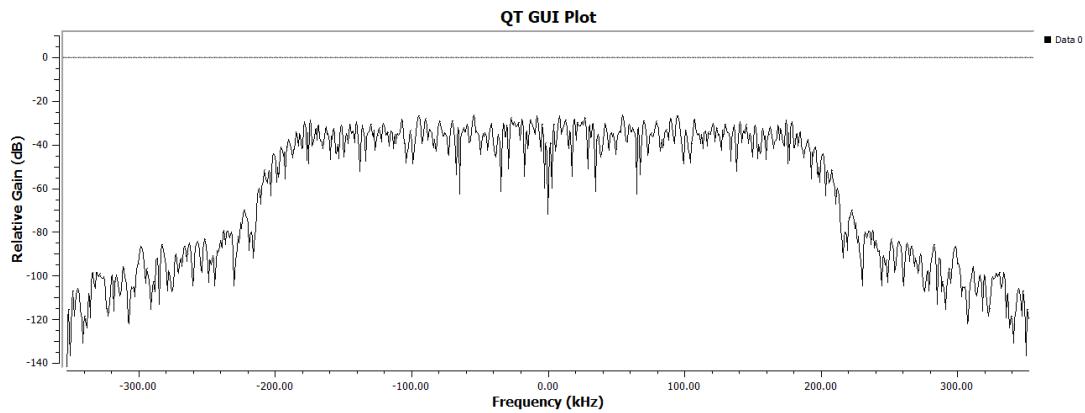
$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{1-1}{4} \right) = 0$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{2-1}{4} \right) = \frac{\pi}{2}$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{3-1}{4} \right) = \pi$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{4-1}{4} \right) = \frac{3\pi}{2}$$

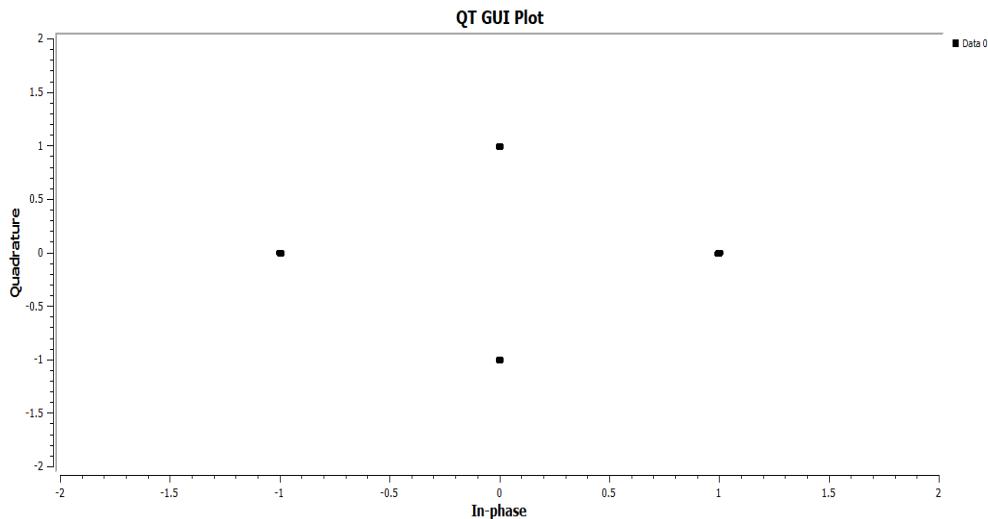
Los resultados del análisis de frecuencia M: 4 mostrados en la figura 78 arrojan más ancho de banda con un valor de 400KHz, y una ganancia relativa que se sigue manteniendo en -20 dB.



**Figura 78.** Respuesta de frecuencia con M: 4.

**Elaborado por:** Investigadora.

La constelación obtenida en la figura 79 muestra las 4 fases de QPSK los cuales son correctos ya que la se encuentran diferenciados en cada bit.



**Figura 79.** Constelación 4PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

### **MODULACIÓN M: 8**

Cálculo de fases de la modulación 8PSK:

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{m-1}{M} \right)$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{1-1}{8} \right) = 0$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{2-1}{8} \right) = \frac{\pi}{4}$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{3-1}{8} \right) = \frac{\pi}{2}$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{4-1}{8} \right) = \frac{3\pi}{4}$$

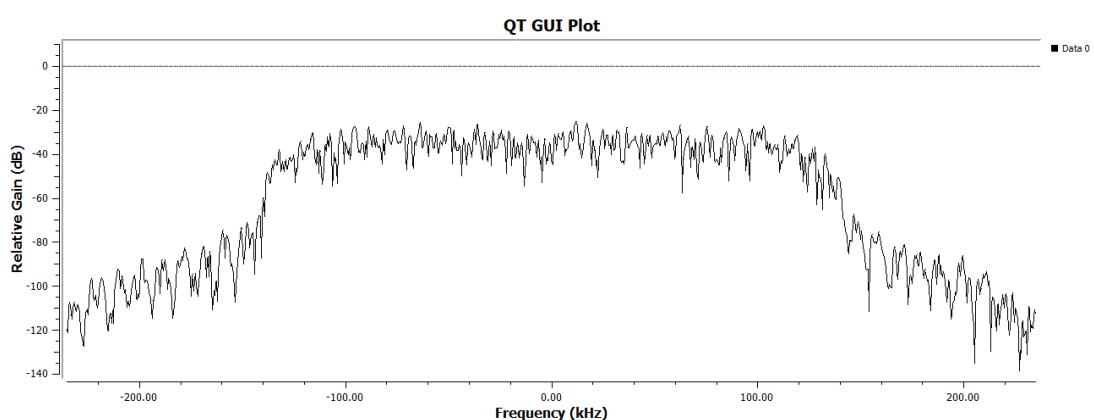
$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{5-1}{8} \right) = \pi$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{6-1}{8} \right) = \frac{5\pi}{4}$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{7-1}{8} \right) = \frac{3\pi}{2}$$

$$\vartheta_m = 2\pi \left( \frac{8-1}{8} \right) = \frac{7\pi}{4}$$

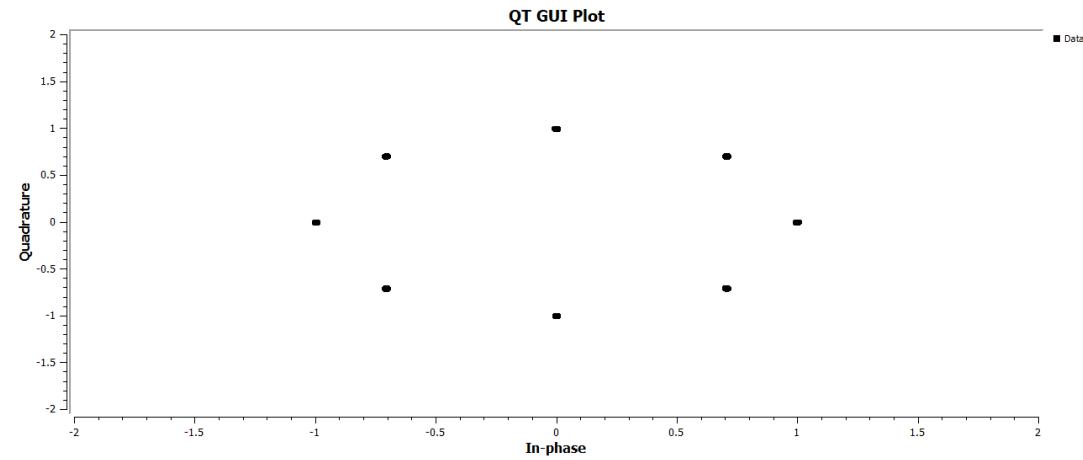
Se muestra en la figura 80 el análisis en frecuencia de 8PSK el cual arroja un ancho de banda de 240 KHz, y una ganancia relativa de -20dB.



**Figura 80.** Respuesta de frecuencia con M: 8.

**Elaborado por:** Investigadora.

La constelación obtenida consta de 8 fases mostradas en la figura 81.

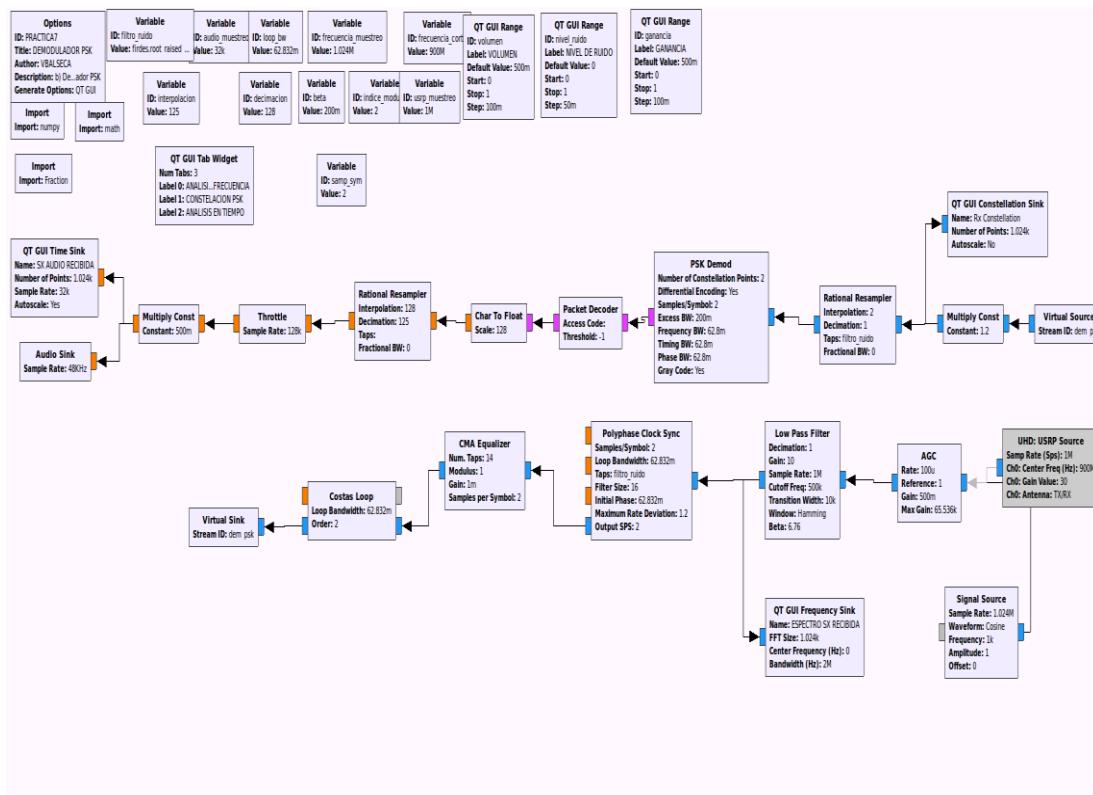


**Figura 81.** Constelación 8PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

Los moduladores desarrollados son de modulación M= 2, 4, 8,16 y 256.

Además, se presenta un literal b) en el cual se propone un demodulador expresado en la figura 82:

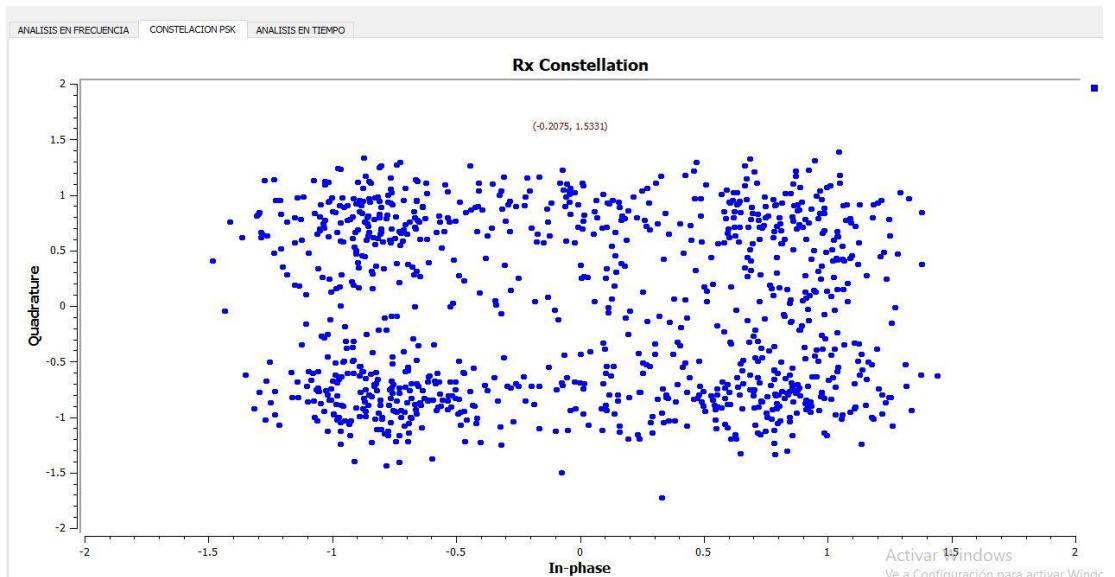


**Figura 82.** Demodulador M-PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

El esquema es muy similar al modulador ya que los bloques invierten su posición, adicionalmente se insertan bloques para lograr la sincronización del mensaje enviado.

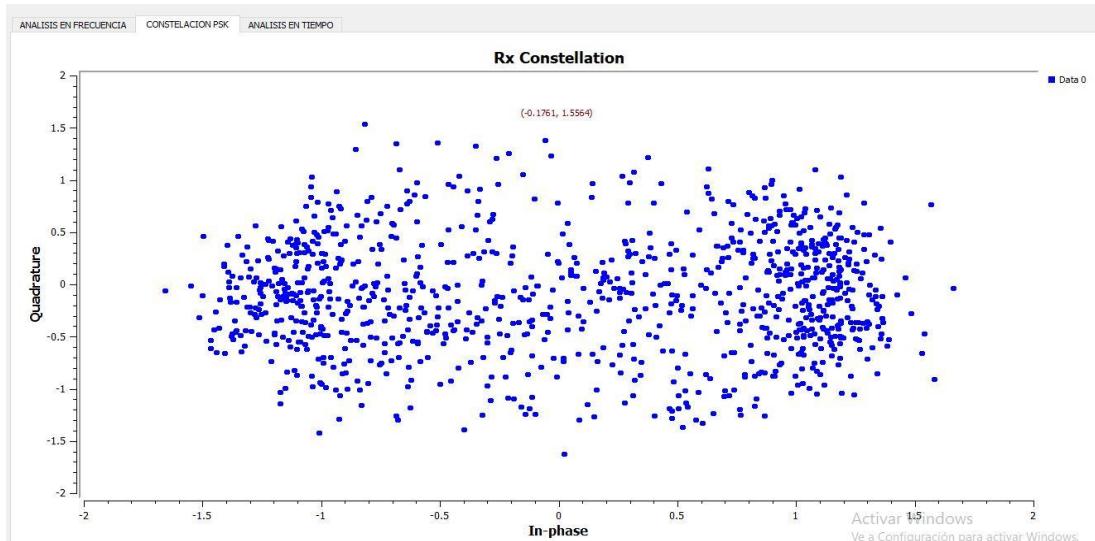
En la figura 83 se muestra la recepción de 4PSK al ser un ambiente de transmisión real se puede observar la dispersión de la constelación.



**Figura 83.** Constelación de la demodulación 4PSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 84 se muestra el resultado de la recepción de BPSK donde se visualiza las fases de los mismos, la cuales se encuentran dispersas puesto que al ser un ambiente real de transmisión existe un retardo en los tiempos de respuesta.



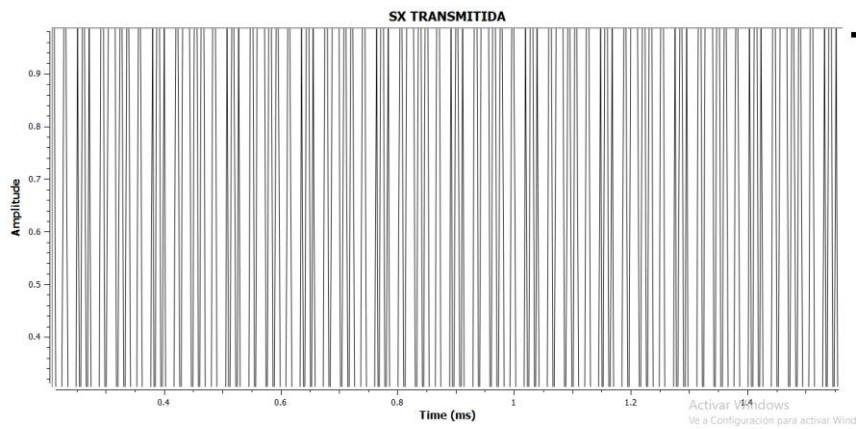
**Figura 84.** Constelación de la demodulación BPSK.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Práctica N°8: Modulación y demodulación digital 4QAM

Mediante la presente práctica el estudiante pudo conocer cómo se realiza la modulación y demodulación 4QAM, para lo cual se empleó un documento de formato txt como fuente de información, seguido de un codificador de bytes, en donde la carga útil es de 1, para texto al utilizar una imagen deberá ser 4 ya que al ser menor la imagen se transmite incompleta, el código de acceso y el preámbulo se los puede dejar con valores predeterminados, pero al usar un código de acceso propio se mejora la transmisión cabe destacar que este código debe ser largo para evitar errores en la transmisión, seguido de aquello se usa el modulador QAM, el mismo que establece el número de puntos de la constelación es decir 4 o 16, la asignación de valor de cada uno por medio del Código Gray, para la visualización de los resultados se utiliza la herramienta QT GUI Constellation en donde se puede observar la constelación obtenida, así como el análisis de frecuencia, a continuación se muestra los resultados en las figuras 85, 86 y 87.

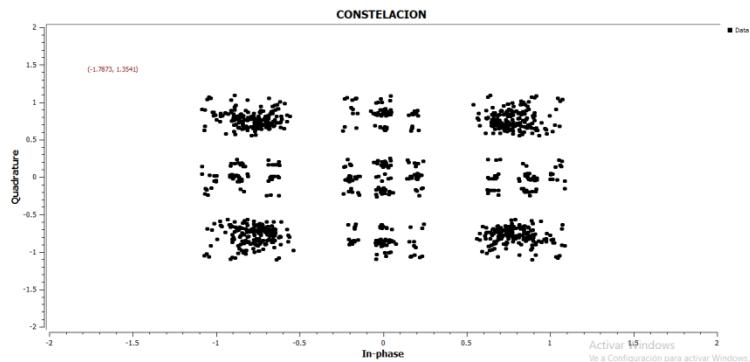
Al verificar la figura 85 se observa la señal transmitida, obtenida a través de los bloques Packet to Unpacket y Chunks to Symbols en la misma que se efectúa un mapeo de una secuencia de bits.



**Figura 85.** Señal Transmitida.

**Elaborado por:** Investigadora.

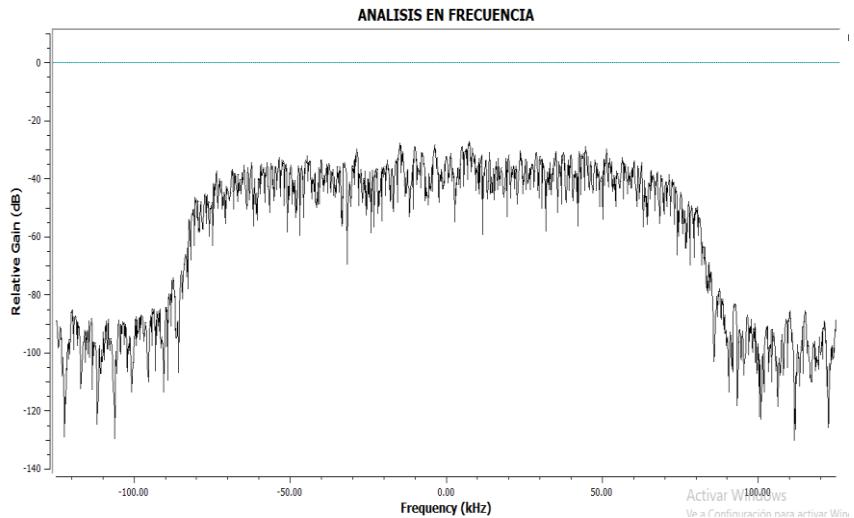
En la figura 86 se observa la constelación obtenida de 4QAM los puntos están más concentrados en las esquinas del diagrama esto se debe a que se realiza una transmisión real donde sufre alteraciones el canal de comunicación.



**Figura 86.** Resultado de la constelación 4 QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

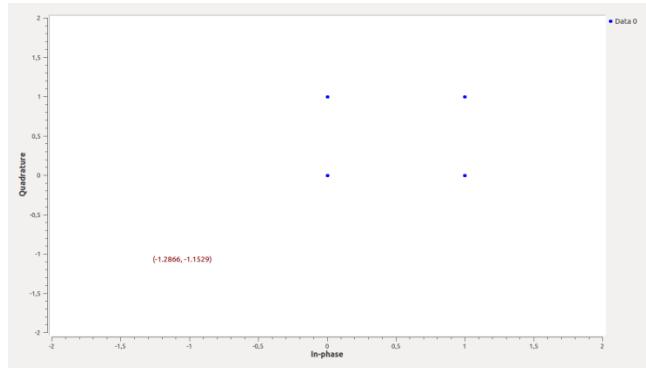
En la figura 87 se observa el análisis en frecuencia donde la ganancia tiene un pico de -30 dB, y un ancho de banda de 160 KHz aproximadamente.



**Figura 87.** Resultado de Análisis de frecuencia de 4 QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

En la figura 88 se muestra el resultado de la demodulación 4QAM mediante la constelación obtenida al ejecutar el programa.

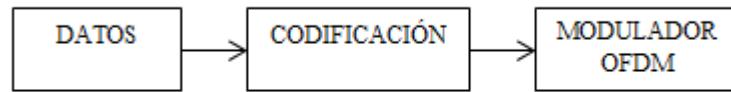


**Figura 88.** Constelación de la demodulación 4QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

### Práctica N°9: Técnica de reducción de PAPR en OFDM

Para efectuar una técnica de reducción de PAPR se analizó las más utilizadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos, para lo cual se optó por aplicar la técnica de reducción de codificación, en la siguiente figura 89 se asocia dicha técnica:



**Figura 89.** Técnica de Codificación para reducción de PAPR.

**Elaborado por:** Investigadora.

Esta técnica es empleada en sistemas de comunicaciones Wi Fi y WiMax en su mayoría, ya que estos emplean modulación OFDM y se presentan el PAPR el cual es un problema de grandes picos en la potencia instantánea con respecto a la potencia media, para lo cual existen diversas técnicas entre las cuales resaltan la codificación ya que esta selecciona la codificación de bits haciendo que se reduzca PAPR mediante codificadores convolucionales.

En la práctica se empleó bloques como scrambler el cual permite reducir la longitud de 0 y 1 de la señal transmitida y un codificador convolucional CCSDS27 la cual está diseñada para televisión digital y comunicaciones inalámbricas WI FI y Wi Max.

Obteniendo los siguientes resultados estipulados en la tabla 24.

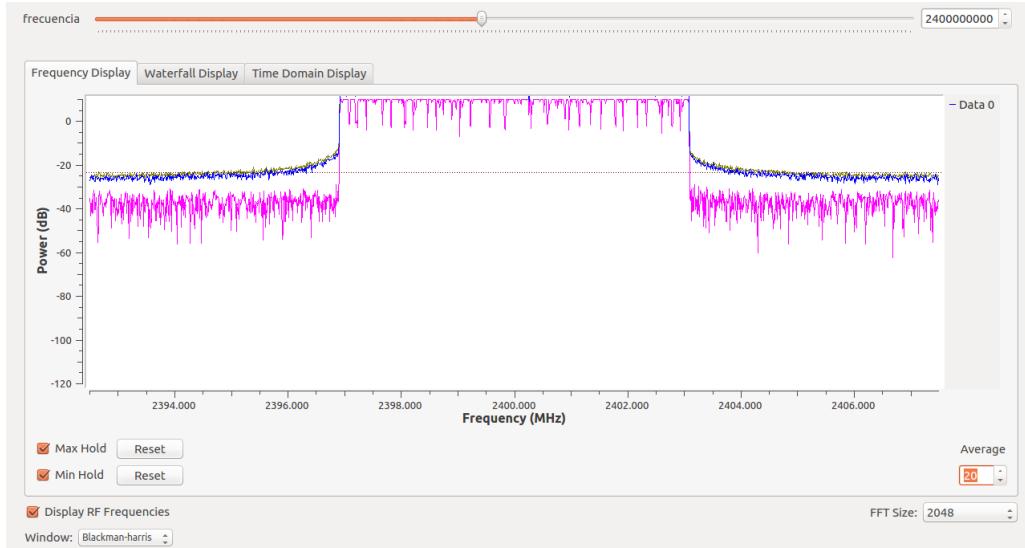
**Tabla 24.** Resultados del método para reducir el PAPR.

Modulación	Ganancia	Ancho de banda
<b>BPSK</b>	-26	2397-2403
<b>16 QAM</b>	-30	2397-2403
<b>64 QAM</b>	-21	2397-2403

**Elaborado por:** Investigadora.

En las figuras 90, 91 y 92 se indica los resultados de PAPR la misma que al analizar la ganancia y la calidad de la transmisión se determina que la modulación 64 QAM es la que presenta mejores niveles de ganancia así como en la transmisión no representa picos abruptos por lo que se reduce significativamente el PAPR.

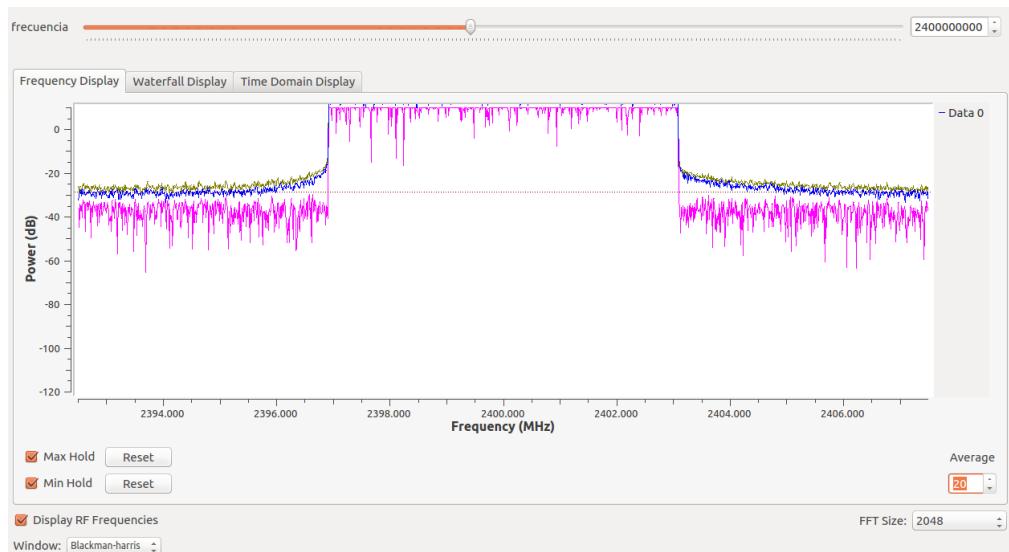
Los resultados que se visualizan en la figura 90 con la modulación BPSK arrojan una ganancia de -26 dB, y la presencia de picos elevados en el rango del ancho de banda, por lo que no es la mejor modulación.



**Figura 90.** Resultado de PAPR con BPSK

**Elaborado por:** Investigadora.

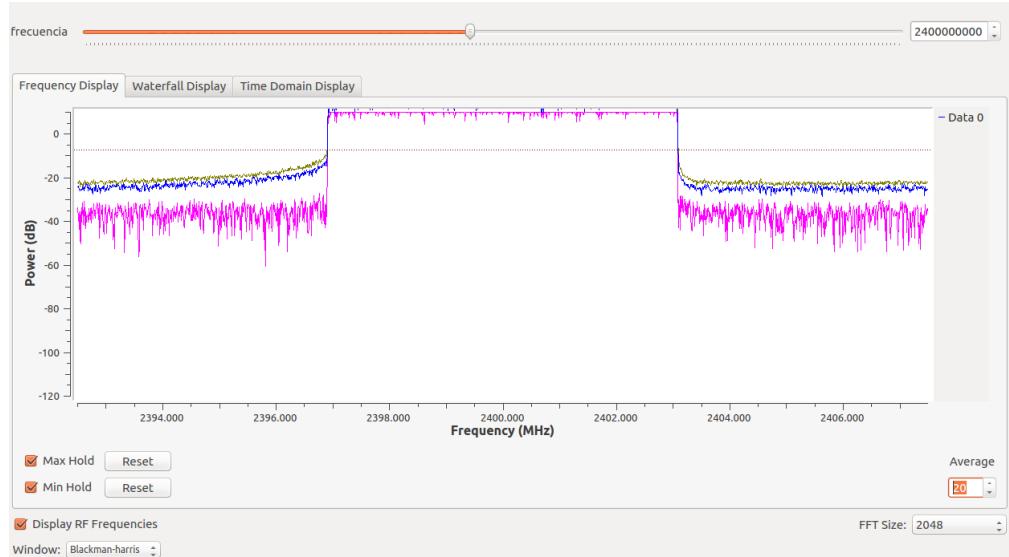
En la figura 91 se observa más PAPR y una ganancia de -30 dB siendo la peor modulación para la transmisión de la señal.



**Figura 91.** Resultado de PAPR con 16 QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Los PAPR presentados en la figura 92 se muestran más reducidos y con una ganancia de -21 por lo que resultan en la modulación más estable mejorando así la transmisión de la señal transmitida.

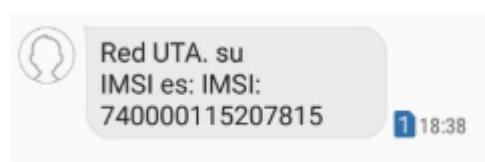


**Figura 92.** Resultado de PAPR con 64 QAM.

**Elaborado por:** Investigadora.

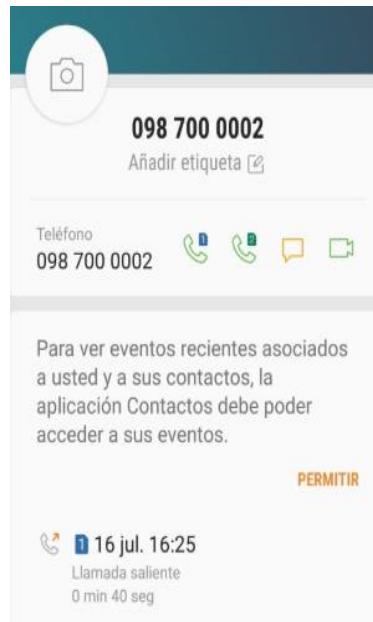
### Práctica N°10: Red GSM

Mediante el proyecto OpenBTS se desarrolló la red GSM, el transceptor empleado fue Osmo TRX el cual permite la comunicación entre el proyecto y el SDR N210, se emplearon los servicios de mensajería, autenticación y registro de suscriptores, conmutación de llamadas, calibración del radio y la ganancia, en la figura 93 se puede observar la identificación del suscriptor a la red y en la figura 94 se muestra el resultado de la llamada efectuada entre usuarios de la red.



**Figura 93.** Registro IMSI en la red.

**Elaborado por:** Investigadora.



**Figura 94.** Llamada realizada en la red GSM.

**Elaborado por:** Investigadora.

Según las pruebas efectuadas se determinó el área de cobertura detalladas en la tabla 25:

**Tabla 25.** Resultados de pruebas de la RED GSM.

Cobertura	LLAMADAS ENTRANTES	MENSAJES	TIEMPO DE CONEXIÓN
5 METROS	Estables	Estables	1 Hora
10 METROS	Estables	Estables	1 Hora
20 METROS	Interferencia	Demora en tiempos de envíos	1 Hora
30 METROS	Interferencia y ruido	Demora en tiempos de envío y recepción	1 Hora

**Elaborado por:** Investigadora.

Mediante los resultados se determinó un rango de aproximadamente 10 a 20 metros a la redonda del USRP N210, con resultados óptimos sin interferencias ni cortes en las llamadas, además la transmisión de mensajes sin demora.

### 3.2.5. Interfaz

Para el desarrollo de las prácticas se optó por documentarlas en una interfaz desarrollada en Phyton, las librerías empleadas son:

- **Pill**

Librería empleada para manejar y procesar imágenes, con el módulo imagetk contiene soporte para crear y modificar objetos Tkinter, se usa el siguiente comando para la instalación de la librería.

```
sudo apt-get install python3-pil.imagetk
```

- **Tkinter**

Librería usada para crear interfaz de usuario, se emplea el siguiente comando para la instalación.

```
sudo apt-get install python3-tk
```

En la figura 95 y 96 se presenta el interfaz realizado para la documentación de las prácticas desarrolladas, las mismas que constan de la guía y de la implementación de cada una de ellas.

La interfaz de la pantalla principal muestra un listado de las prácticas desarrolladas, así como una presentación de los autores reflejados en la figura 95.



**Figura 95.** Pantalla principal del interfaz.

**Elaborado por:** Investigadora.

Para el documentación de las prácticas se presenta una descripción general de la práctica con los materiales que se van a usar, así como tres botones en los cuales constan la guía con todos los pasos y configuraciones de bloques, el resultado en el cual se puede abrir el programa ya estructurado para que el estudiante pueda manipularlo y finalmente un botón con la opción salir para regresar a la pantalla principal, como se muestra en la figura 96.



**Figura 96.**Interfaz para desarrollo de prácticas.

**Elaborado por:** Investigadora.

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. CONCLUSIONES**

- La comunicación entre el hardware USRP N210 y software GNU Radio se efectúa por medio del controlador UHD (USRP Hardware Driver) propia de este dispositivo el mismo que proporciona el control necesario para transportar muestras de formas de onda, frecuencia de muestreo, frecuencia central, ganancia, entre otros parámetros del radio, este es compatible con cualquier sistema operativo como Windows, Linux o Mac OS, de acuerdo a las librerías que se requieren para las diversas aplicaciones en GNU Radio existe una mayor compatibilidad y estabilidad en el sistema operativo Ubuntu LTE 16.04, puesto que en este se desarrolló el proyecto OpenBTS de SDR, adicionalmente se puede establecer comunicación mediante otro driver como es Osmo SDR el cual básicamente está más enfocado en comunicaciones móviles como base de la red GSM.
- Al analizar los contenidos de las asignaturas se tomó en cuenta que todo tiene una secuencia relativa entre la transmisión y recepción de cualquier Sistema de Comunicación, los cuales realizan procesos como multiplexación, amplificación modulación, muestreo, entre otros; pudiendo ser implementados mediante los bloques de GNU Radio, el software permitió que el estudiante analice cada parámetro que influye ya sea en la transmisión o recepción de información,

aplicando conceptos como ancho de banda, frecuencia de operación, frecuencia de muestreo, entre otros, alternado así el hardware del dispositivo.

- Para las pruebas realizadas en los moduladores y demoduladores M PSK el factor primordial es el bloque Polyphase Clock Sync el cual es un arreglo de filtros de tipo coseno alzado para la sincronización de símbolos entre el transmisor y receptor, cuyo valor está determinado en 2 según las características del USRP N210, ya que se transmite una señal analógica al emplear este bloque se minimizo el retardo.
- En el proyecto OpenBTS se integra los servicios de llamadas y mensajería, en conjunto con Asterisk, SIPAuthServe, SMQuere, para la creación de una Red GSM, a través de Osmo-TRX el cual es un transductor que se emplea para funcionamiento correcto del prototipo, con una eficiencia del 98%, ya que la autentificación del terminal al prototipo de Red GSM depende del dispositivo terminal del usuario, ya que si el mismo es de alta gama se debe cambiar la configuración de redes móviles para que se establezca en red GSM como prioridad y no en red LTE.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

- Tomar en cuenta que se debe emplear el bloque throttle ya que el mismo ayuda a controlar el consumo de los recursos memoria de la CPU de la PC, permitiendo que no se exceda en las muestras que se van a tomar en un 30% para el procesamiento de la señal.
- Para el desarrollo de aplicaciones satelitales se recomienda adquirir nuevas tarjetas secundarias GPSDO, las mismas que deben ser incorporadas como tarjetas secundarias en las ranuras de expansión del USRP N210.
- Para evitar problemas de comunicación se debe tener cuidado al manipular el puerto y conectar las antenas antes de poner en ejecución el programa ya que los mismos son sensibles, debido a que a la impedancia de la antena se puede generar una onda reflejada y así dañar el equipo.
- Debido a que la frecuencia de muestreo es un factor importante en cualquier tipo de transmisión su valor no debe exceder de 50 millones de muestras por segundo ya que el hardware no soporta la transmisión y/ recepción.

## MATERIALES DE REFERENCIA

### Referencias Bibliográficas

- [1] Wireless Innovation Forum “Introduction to SDR,” 2017. [En línea]. Available: [http://www.wirelessinnovation.org/Introduction\\_to\\_SDR](http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR). [Último acceso: 01 03 2019]
- [2] D. Angulo, «Desarrollo de prácticas de laboratorio aplicando radio definido por software para sistemas de telefonía móvil celular,» Repositorio de la Universidad Santo Tomás, 09 2015. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2764/Angulodavid2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 29 03 2019].
- [3] A. M. Francisco Vera, «Diseño de un prototipo de pruebas de un radar monoestático utilizando Radio Definida por Software,» Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana, 04 2017. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14151/1/UPS-GT001828.pdf>. [Último acceso: 03 04 2019].
- [4] A. T. Julián Morales, «Desarrollo de guías de laboratorio aplicando radio definido por software para la implementación de un handover con estaciones base de segunda generación y la primera fase de una estación base de cuarta generación,» Repositorio de la Universidad Santo Tomás, 2017. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4112/MoralesJulian2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 30 03 2019].
- [5] S. M. Hashir, «PSK Modulation/Demodulation and Performance Evaluation in FM Band Using USRP, » de Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 2018.
- [6] B. Lisintuña, «Aplicación de un sistema SDR (Radio Definida por Software) para prácticas multidisciplinarias en la Carrera de Telecomunicaciones de la Universidad de Israel,» Repositorio de la Universidad Tecnológica Israel, 2019. [En línea].

Available: <https://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/2067/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2019-032.pdf>. [Último acceso: 30 03 2019].

[7] A. Monteros, «Diseño y elaboración de prácticas de laboratorio para la materia de Fundamentos de Comunicaciones usando Radio Definida por Software,» Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional, 2019. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20182/1/CD%209647.pdf>. [Último acceso: 09 09 2019].

[8] N. A. Kambiz Madani, Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions, Inglaterra: Wiley, 2003.

[9] «Presupuesto general del estado del programa anual de inversiones - consejo sectorial gastos (us dólares) en el Ejercicio: 2017,» Ministerio de Economía y Finanzas, 2017. [En línea]. Available: <https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/18Plan-Anual-de-Inversiones-Consejo-Sectorial.pdf>. [Último acceso: 01 04 2019].

[10] Universidad Técnica de Ambato, «Facultad de Ingeniería en Sistemas, Eléctronica e Industrial,» [En línea]. Available: <https://fisei.uta.edu.ec/infraestructura.html>. [Último acceso: 22 04 2019].

[11] J. B. y. V. Kovarik, "Software Defined Radio: The Software Communications", England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

[12] J. Madrigal, «Modelamiento y simulación de la capa física de una red LTE (RELEASE 8),» Repositorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas, 13 01 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11389/1/T-ESPE-048620.pdf>. [Último acceso: 28 03 2019].

[13] M. Ettus, USRP User's and Developer's Guide, Ettus Research.

[14] W. Technologies, «Software-Defined Radio, » 09 2002. [En línea]. Available: [http://www.ab4oj.com/dl/sdr\\_wipro.pdf](http://www.ab4oj.com/dl/sdr_wipro.pdf). [Último acceso: 01 04 2019].

[15] J. M. Ivan Pinar, «Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software,» Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla, 2011. [En línea]. Available: <http://docplayer.es/12938116-Laboratorio-de->

comunicaciones-digitales-radio-definida-por-software.html. [Último acceso: 02 04 2019].

[16] J. B. y. V. J. Kovarik, "Software Defined Radio: The Software Communications", England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

[17] P. B. Kenington, RF and baseband techniques for software defined radio, England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

[18] P. D. Angulo Hugo, «Diseño y desarrollo de un radio definido por software, para el ejército ecuatoriano, mediante la utilización de una tarjeta USRP y la herramienta simulink de Matlab,» Repositorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas, 2011. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/4526/T-ESPE-032707.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 03 04 2019].

[19] «Wireless Innovation Forum,» [En línea]. Available: [https://www.wirelessinnovation.org/Introduction\\_to\\_SDR](https://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR). [Último acceso: 09 09 2019].

[20] «SparkFun Electronics, » [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13001>. [Último acceso: 09 09 2019].

[21] «RTL-SDR.COM, » [En línea]. Available: <https://www rtl-sdr.com/about-rtl-sdr>. [Último acceso: 09 09 2019].

[22] «AIRSPY, » [En línea]. Available: <https://airspy.com>. [Último acceso: 09 09 2019].

[23] «Project Ubertooth, » [En línea]. Available: <http://ubertooth.sourceforge.net/>. [Último acceso: 09 09 2019].

[24] «National Instruments, » [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>. [Último acceso: 09 09 2019].

[25] «Ettus Research, » [En línea]. Available: <https://kb.ettus.com/USRP1>. [Último acceso: 09 09 2019].

- [26] ««Ettus Research, » [En línea]. Available: <https://kb.ettus.com/USRP2>. [Último acceso: 09 09 2019].
- [27] ««Ettus Research, » [En línea]. Available: <http://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>. [Último acceso: 09 09 2019].
- [28] C.Parra, «Prototipo de Red GSM basada en SDR (Software Defined Radio),» Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional, 2019. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20182/1/CD%209647.pdf>. [Último acceso: 09 09 2019].
- [29] I.Perejil, «Implementación de terminales de Radio Cognitiva en la banda de TV,» Repositorio de la Universidad de Catalunia, 2016. [En línea]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84101/Implementacion%20de%20terminales%20de%20Radio%20Cognitiva%20en%20la%20banda%20de%20TV.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 10 10 2019].
- [30] The GNU Radio Foundation, «GNU Radio THE FREE & OPEN SOFTWARE RADIO ECOSYSTEM,» [En línea]. <https://www.gnuradio.org/about/> [Último acceso: 12 10 2019].
- [31] F.Lincango, «Implementación de un prototipo de sistema de comunicación inalámbrico OFDM en SDR,» Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional, 2018. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19827/1/CD-9231.pdf>. [Último acceso: 13 10 2019].
- [31] L.Zhang, «Implementation of Wireless Communication base on Software Defined Radio,» [En línea]. Available: [http://oa.upm.es/21618/1/TESIS\\_MASTER\\_LEI\\_ZHANG.pdf](http://oa.upm.es/21618/1/TESIS_MASTER_LEI_ZHANG.pdf). [Último acceso: 13 01 2020].
- [33] ««Ettus Research, » [En línea]. Available: [https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf). [Último acceso: 13 01 2020].
- [34] ««National Instruments, » [En línea]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>. [Último acceso: 13 01 2020].

- [35] ««Wireless Research Innovation and Development Laboratory, » [En línea]. Available: <http://wirid-lab.umng.edu.co/vert-900/>. [Último acceso: 13 01 2020].
- [36] ««Ettus Research, » [En línea]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/vert900/>. [Último acceso: 14 01 2020].
- [37] ««Ettus Research, » [En línea]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/>. [Último acceso: 15 01 2020].
- [38] M. Araujo, «Implementación de un sistema de radio cognitiva para la detección de bandas de frecuencias TVWS,» Repositorio de la Universidad de la Fuerzas Armadas, 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14849/1/T-ESPE-040376.pdf>. [Último acceso: 16 10 2020].
- [39] ««National Instruments, » [En línea]. Available: <http://www.ni.com/product-documentation/53409/es/>. [Último acceso: 16 10 2020].
- [40] Foster, Elvis. A comparative analysis of the c++, java, and python languages.
- [41] Arcotel, NORMA TÉCNICA PARA EL SERVICIO DE TELEVISIÓN ANALÓGICA Y PLAN DE DISTRIBUCIÓN DE CANALES (Resolución No. 1779-CONARTEL-01). [En línea]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/Norma-Tecnica-de-Televisión-Analogica.pdf>. [Último acceso: 16 10 2020].
- [42] M. d. Trabajo, «Ministerio del Trabajo,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.trabajo.gob.ec/biblioteca/>. [Último acceso: Enero 2019].

# **ANEXOS**

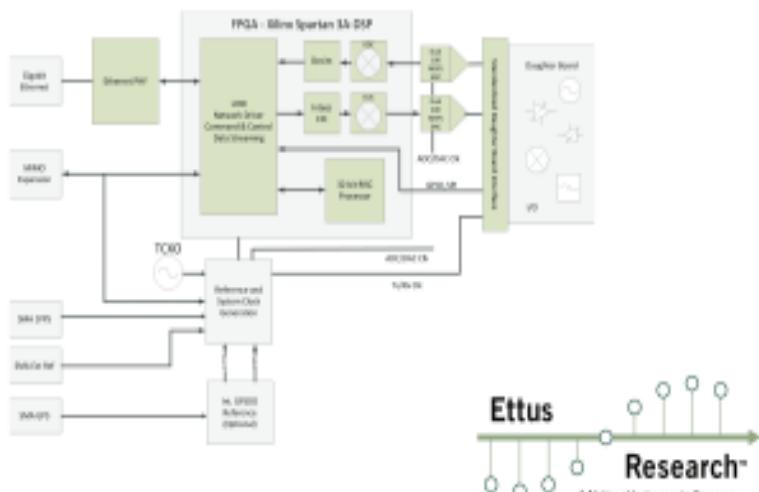
## ANEXO A: Datasheet USRP N210.

### USRPTM N200/N210 NETWORKED SERIES

#### SPECIFICATIONS

Spec	Typ.	Unit	Spec	Typ.	Unit			
<b>POWER</b>								
DC Input	6	V	SSB/LO Suppression	35/50	dBc			
Current Consumption	1.3	A	Phase Noise (1.8 Ghz)					
w/ WBX Daughterboard	2.3	A	10 kHz	-80	dBc/Hz			
<b>CONVERSION PERFORMANCE AND CLOCKS</b>								
ADC Sample Rate	100	MS/s	100 kHz	-100	dBc/Hz			
ADC Resolution	14	bits	1MHz	-137	dBc/Hz			
ADC Wideband SFDR	88	dBc	Power Output	15	dBm			
DAC Sample Rate	400	MS/s	IIP3	0	dBm			
DAC Resolution	16	bits	Receive Noise Figure	5	dB			
DAC Wideband SFDR	80	dBc	<b>PHYSICAL</b>					
Host Sample Rate (8b/16b)	50/25	MS/s	Operating Temperature	0 to 55°	C			
Frequency Accuracy	2.5	ppm	Dimensions (l x w x h)	22x16x5	cm			
w/ GPSDO Reference	0.01	ppm	Weight	1.2	kg			

\* All specifications are subject to change without notice.



#### ABOUT ETTUS RESEARCH:

Ettus Research is an innovative provider of software defined radio hardware, including the original Universal Software Radio Peripheral (USRP) family of products. Ettus Research products maintain support from a variety of software frameworks, including GNU Radio. Ettus Research is a leader in the GNU Radio open-source community, and enables users worldwide to address a wide range of research, industry and defense applications. The company was founded in 2004 and is based in Mountain View, California. As of 2010, Ettus Research is a wholly owned subsidiary of National Instruments.

1043 North Shoreline Blvd  
Suite 100  
Mountain View, CA 94034  
P 650.967.2870 [www.ettus.com](http://www.ettus.com)  
F 866.807.9801

## ANEXO B: Datasheet Antena VERT 900.

### SPECIFICATION

1. Description	: WSS016 Antenna With SMA(M)
2. Customer	: Etus Research LLC
3. Model No.	: WSS016
4. Part No.	: RU1MPA0001A
5. Antenna Profile	: 236.5 mm (see Drawing)
6. Color	: Black
7. Electrical Characteristics	
Operating Frequency	: 824~960~1710~1990MHz
Antenna Type	: Dipole
Polarization Type	: Linear
Type of Radiation	: Toroidal
Impedance	: 50 Ohm nominal
V.S.W.R.	: 3.0:1 Max.
8. Mechanical Characteristics	
Swivel	: 90 degrees
Connector	: SMA(M)
Core	: N/A
9. Raw Material	
Coaxial Cable	: RG-316
Housing	: TPU
Hinge	: PC+ALLOY