

SISTEMA DE COMUNICACIÓN SDR PARA MODULACIÓN PSK Y QAM



Res. No. 16740, 2017-2021.

Vigilada MinEducación.

DANIEL ANDRES NIEVA SUAREZ-CODIGO 2156812

JOSE RICARDO SANABRIA LEMOS-CODIGO 2127337

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRONICA
PROGRAMA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2018**

SISTEMA DE COMUNICACIÓN SDR PARA MODULACIÓN PSK Y QAM



Res. No. 16740, 2017-2021.

Vigilada MinEducación.

DANIEL ANDRES NIEVA SUAREZ-CODIGO 2156812

JOSE RICARDO SANABRIA LEMOS-CODIGO 2127337

**Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones**

**Director
HELMUT ALEXANDER RUBIO
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2018**

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

JUAN MANUEL NUÑEZ

JUAN CARLOS MENA

Santiago de Cali, 01 Noviembre de 2018.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. OBJETIVOS	22
3.1. OBJETIVO GENERAL	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. MARCO TEÓRICO	23
4.1 MODULACION DIGITAL	23
4.1.1 PSK	23
4.1.2 QAM	26
4.2 SDR	28
4.3 GNU RADIO	30
4.4 USRP	32
5. METODOLOGÍA	36
5.1 ETAPAS DEL PROYECTO	36
6. RESULTADOS	38
6.1 MODULACIÓN BPSK	39
6.1.1 Wav File Source	40
6.1.2 Throttle	41
6.1.3 Rational Resampler	41
6.1.4 Float To Char	42
6.1.5 Packet Encoder	42
6.1.6 PSK Mod	43

6.1.7 Low Pass Filter	44
6.1.8 Rational Resampler	44
6.1.9 Multiply Const	44
6.1.10 UHD URSP Sink	45
6.1.11 Demodulación BPSK	47
6.1.12 UHD: URSP Source	48
6.1.13 AGC	49
6.1.14 Low Pass Filter	50
6.1.15 Polyphase Clock Sync	50
6.1.16 CMA Equalizer	51
6.1.17 Costas Loop	51
6.1.18 Multiply Const	52
6.1.19 Rational Resampler	52
6.1.20 PSK Demod	52
6.1.21 Packet Decoder	53
6.1.22 Char To Float	53
6.1.23 Rational Resampler	53
6.1.24 Throttle	54
6.1.25 Multiply Const	54
6.1.26 Audio Sink	55
6.2 MODULACION 4QAM	56
6.2.1 Wav File Source	58
6.2.2 Throttle	58
6.2.3 Rational Resampler	59
6.2.4 Float To Char	59
6.2.5 Packet Encoder	60
6.2.6 QAM Mod	60
6.2.7 Low Pass Filter	61
6.2.8 Rational Resampler	61
6.2.9 Multiply Const	62
6.2.10 UHD URSP Sink	62
6.2.11 Demodulación 4QAM	64
6.2.12 UHD: URSP Source	65
6.2.13 AGC	66
6.3.14 Low Pass Filter	67
6.2.15 Polyphase Clock Sync	67
6.2.16 CMA Equalizer	68
6.2.17 Costas Loop	68
6.2.18 Multiply Const	69
6.2.19 Rational Resampler	69
6.2.20 QAM Demod	69
6.2.21 Packet Decoder	70
6.3.22 Char To Float	70
6.2.23 Rational Resampler	70
6.2.24 Throttle	71

6.2.25 Multiply Const	71
6.2.26 Audio Sink	71
6.3 MODULACIÓN 8PSK	73
6.3.1 Wav File Source	75
6.3.2 Throttle	76
6.3.3 Rational Resampler	76
6.3.4 Float To Char	77
6.3.5 Packet Encoder	77
6.3.6 PSK Mod	78
6.3.7 Low Pass Filter	78
6.3.8 Rational Resampler	79
6.3.9 Multiply Const	79
6.3.10 UHD URSP Sink	80
6.3.11 Demodulación 8PSK	83
6.3.12 UHD: URSP Source	83
6.3.13 AGC	84
6.3.14 Low Pass Filter	85
6.3.15 Polyphase Clock Sync	85
6.3.16 CMA Equalizer	86
6.3.17 Costas Loop	86
6.3.18 Multiply Const	87
6.3.19 Rational Resampler	87
6.3.20 PSK Demod	87
6.3.21 Packet Decoder	88
6.3.22 Char To Float	88
6.3.23 Rational Resampler	88
6.3.24 Throttle	89
6.4.25 Multiply Const	89
6.4.26 Audio Sink	90
6.4 MODULACIÓN 16QAM	91
6.4.1 Vol	92
6.4.2 Noise_level	93
6.4.3 Gain_in	94
6.4.4 Add	94
6.4.5 Noise Source	95
6.5. ANALISIS DE RESULTADOS	97
 7. CONCLUSIONES	99
 BIBLIOGRAFÍA	100
 ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Modulador BPSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación	24
Figura 2 Modulador 8-PSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación	25
Figura 3 Modulador 4QAM, QPSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación	27
Figura 4 Modulador 16-QAM: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación	28
Figura 5 Transmisor: (a) transmisor tradicional; (b) transmisor SDR; (c) receptor tradicional; (d) receptor SDR	29
Figura 6 Arquitectura Gnu Radio	31
Figura 7 Código de colores datos utilizados en Gnu Radio	32
Figura 8 Diagrama básico del Universal Software Radio Peripheral	32
Figura 9 Fotografía interior USRP	34
Figura 10 Foto Montaje equipos	38
Figura 11 Diagrama de Bloques Transmisor BPSK	39
Figura 12 Parámetros Wave File Source	41
Figura 13 Parámetros Throttle	41
Figura 14 Parámetros Rational Resampler	42
Figura 15 Parámetros Float To Char	42
Figura 16 Parámetros Packet Encoder	43
Figura 17 Parámetros PSK Mod	43
Figura 18 Parámetros Low Pass Filter	44
Figura 19 Parámetros Rational Resampler	44
Figura 20 Parámetros QT Gui Range	45
Figura 21 Parámetros UHD: USRP Sink	46
Figura 22 Constelación modulación BPSK	47

Figura 23 Espectro modulación BPSK	47
Figura 24 Diagrama de Bloques Receptor BPSK	48
Figura 25 Parámetros UHD: USRP Source	49
Figura 26 Parámetros ACG	50
Figura 27 Parámetros Low Pass Filter	50
Figura 28 Parámetros Polyphase Clock Sync	51
Figura 29 Parámetros CMA Equalizer	51
Figura 30 Parámetros Costas Loop	52
Figura 31 Parámetros Rational Resampler	52
Figura 32 Parámetros PSK Demod	53
Figura 33 Parámetros Packet Encoder	53
Figura 34 Parámetros Rational Resampler	54
Figura 35 Parámetros Throttle	54
Figura 36 Audio Sink	55
Figura 37 Constelación Demodulación BPSK	55
Figura 38 Espectro Demodulación BPSK	56
Figura 39 Diagrama de Bloques Modulación 4QAM	56
Figura 40 Parámetros Wave File Source	58
Figura 41 Parámetros Throlttle	58
Figura 42 Parámetros Rational Resampler	59
Figura 43 Parámetros Float To Char	59
Figura 44 Parámetros Packet Encoder	60
Figura 45 Parámetros QAM Mod	61
Figura 46 Parámetros Low Pass Filter	61
Figura 47 Parámetros Rational Resampler	62
Figura 48 Parámetros QT Gui Range	62
Figura 49 Parámetros UHD: USRP Sink	63
Figura 50 Constelación modulación 4QAM	64
Figura 51 Espectro modulación 4QAM	64
Figura 52 Diagrama de Bloques Receptor 4QAM	65

Figura 53 Parámetros UHD: USRP Source	66
Figura 54 Parámetros ACG	67
Figura 55 Parámetros Low Pass Filter	67
Figura 56 Parámetros Polyphase Clock Sync	68
Figura 57 Parámetros CMA Equalizer	68
Figura 58 Parámetros Costas Loop	69
Figura 59 Parámetros Rational Resampler	69
Figura 60 Parámetros QAM Demod	70
Figura 61 Parámetros Packet Encoder	70
Figura 62 Parámetros Rational Resampler	71
Figura 63 Parámetros Throttle	71
Figura 64 Audio Sink	72
Figura 65 Constelación Demodulación 4QAM	72
Figura 66 Espectro Demodulación 4QAM	73
Figura 67 Diagrama de Bloques Transmisor 8psk	74
Figura 68 Parámetros Wave File Source	76
Figura 69 Parámetros Throlttle	76
Figura 70 Parámetros Rational Resampler	77
Figura 71 Parámetros Float To Char	77
Figura 72 Parámetros Packet Encoder	78
Figura 73 Parámetros PSK Mod	78
Figura 74 Parámetros Low Pass Filter	79
Figura 75 Parámetros Rational Resampler	79
Figura 76 Parámetros QT Gui Range	80
Figura 77 Parámetros UHD: USRP Sink	81
Figura 78 Constelación modulación 8PSK	82
Figura 79 Espectro modulación 8PSK	82
Figura 80 Diagrama de Bloques Receptor 8PSK	83
Figura 81 Parámetros UHD: USRP Source	84
Figura 82 Parámetros ACG	85

Figura 83 Parámetros Low Pass Filter	85
Figura 84 Parámetros Polyphase Clock Sync	86
Figura 85 Parámetros CMA Equalizer	86
Figura 86 Parámetros Costas Loop	87
Figura 87 Parámetros Rational Resampler	87
Figura 88 Parámetros PSK Demod	88
Figura 89 Parámetros Packet Encoder	88
Figura 90 Parámetros Rational Resampler	89
Figura 91 Parámetros Throttle	89
Figura 92 Audio Sink	90
Figura 93 Constelación Demodulación 8PSK	90
Figura 94 Espectro Demodulación 8PSK	91
Figura 95 Diagrama de bloques modulación 16QAM simulado	92
Figura 96 Parámetros configuración vol.	93
Figura 97 Parámetros de configuración Noise_level	93
Figura 98 Parámetros de configuración Gain_in	94
Figura 99 Configuración de Parámetros Add	95
Figura 100 Parámetros de Configuración Noise Source	95
Figura 101 Constelación 16QAM sin ruido	96
Figura 102 Constelación 16QAM con ruido	96
Figura 103 Diagrama de bloques transmisor FM	103
Figura 104 Parámetros wavfile file source	104
Figura 105 Parámetros Low Filter	105
Figura 106 Parámetros NBFM Transmit	105
Figura 107 Parámetros Scope Sink	106
Figura 108 Parámetros UHD: USRP Sink	107
Figura 109 Espectro Transmitido en FM	108
Figura 110 Diagrama de bloques Receptor FM	108
Figura 111 Espectro recibido FM	109
Figura 112 Parámetros USRP Source	109

Figura 113 Parámetros Low Pass Filter 111

Figura 114 Parámetros NBFM Receive 111

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Sistema de Comunicación FM	103

ABREVIACIONES

FM -Frequency Modulation: Modulación en frecuencia

IEEE- The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc: Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica.

PSK- Phase Shift Keying: Modulación por desplazamiento de fase.

QAM- Quadrature Amplitude Modulation: Modulación de amplitud en cuadratura

Rx: Receptor.

SDR- Software Defined Radio: Radio definida por software

Tx: Transmisor.

USRP- Universal Software Radio Peripheral: Software Universal de Radio

RESUMEN

Actualmente las transmisiones digitales son las más utilizadas debido a que en cuanto a costos, velocidad, consumo de energía, ancho de banda y optimización, presentan mayores ventajas que las transmisiones análogas, dado que presentan mayor inmunidad al ruido, se pueden procesar y multi-canalizar mayor número de señales digitales

La siguiente investigación se enfoca en dar respuesta al siguiente interrogante, ¿ Cómo implementar un sistema de transmisión digital con modulación de orden variable empleando tecnología SDR que brinde soporte a procesos de investigación y docencia en el área de sistemas inalámbricos en la universidad Autónoma de Occidente? para esto se abordó el problema de investigación en tres etapas las cuales permiten entender las telecomunicaciones de una forma didáctica en cuanto al entorno y sus aplicaciones

Uno de los aportes más importantes que hace esta investigación es realizar un documento práctico orientado a la parte de aprendizaje y lúdica, que pueda ser implementado en futuros proyectos de investigación que contenga esquemas base de transmisión y recepción empleando tecnologías SDR para la implementación de sistemas de modulación digitales y análogas por medio de los equipos USRP1 que se encuentran en el laboratorio de telecomunicaciones en la universidad Autónoma de Occidente.

Palabras claves:

Modulación PSK, QAM. Tecnología SDR. Transmisión de datos

INTRODUCCIÓN

Desde el primer desarrollo de comunicación que fue realizado por medio de un código morse, se han empleado métodos por transmisiones analógicas, estas a su vez fueron de gran utilidad en los inicios de nuestros tiempos, pero debido a la perdida de información y portabilidad se desarrolló un sistema basado en la utilización de antenas para el aprovechamiento del espectro electromagnético (ondas de radio). En su libro Tomasi afirma que:

El primero en realizar este tipo de transmisión fue el señor Guglielmo Marconi quien implementó la transmisión inalámbrica de radio a través de la atmósfera terrestre en el año de 1894, con el invento del tríodo o válvula de vacío se desarrollan las primera transmisiones de radio comercial en los años de 1920 donde se emiten señales de amplitud modulada (AM), posteriormente en el año de 1933 el señor Edwin Howard Armstrong inventa la modulación en frecuencia (FM)¹.

Según Merelo en los años 60 se emplea por primera vez las transmisiones digitales, estas transmisiones se destacan por la implementación redes de conmutación por paquetes, método de fragmentar mensajes². Este tipo de transmisión permite que por medio de un canal se realicen de una manera uniforme el envío de información, ya sean datos o voz, donde son recibidos por un dispositivo llamado receptor que desfragmentará la información y la organizará de manera uniforme para reproducir el mensaje adecuadamente. Actualmente las transmisiones digitales son las más utilizadas debido a que en cuanto a costos, velocidad, consumo de energía, ancho de banda y optimización, presentan mayores ventajas que las transmisiones analógicas, dado que presentan mayor inmunidad al ruido, se pueden procesar y multi-canalizar mayor número de señales digitales, son mucho más factibles de procesar y almacenar. Existen varios tipos de modulaciones digitales, actualmente las de mayor uso son las modulaciones PSK y QAM. El empleo de modulaciones digitales como PSK y QAM pueden variar de acuerdo con las necesidades, ancho de banda y velocidad de transmisión de datos. Para realizar cada la transmisión digital y recepción digital de datos convencionales se deben variar el tipo de tecnologías.

¹TOMASI, Wayne. Introducción a las comunicaciones electrónicas. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4 ed. México: PEARSON EDUCACION. 2013, p 1

²MERELLO, Juan Julián. Historia de la red [En línea]. Introducción a la Internet. Granada. (16 de marzo de 1995), párr. 7. [Consultado: 7 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://kal-el.ugr.es/internet/subsection3_2_2.html

En el año de 1991 a 1995 aparecen los primeros sistemas SDR (software defined radio)³, gracias a esta tecnología se emplea una herramienta donde no es necesario un hardware específico para la modulación y demodulación para los distintos tipos de comunicaciones, solo se necesita el cambio de estructura de algunos elementos y parámetros que se ejecutarán por medio de un computador y el sistema SDR.

En el siguiente proyecto se realiza la transmisión y recepción de datos basadas en las modulaciones digitales PSK y QAM, para ello se implementa las modulaciones 2psk, 4qam, 8psk y 16qam. En primera instancia se realizaron las pruebas con modulaciones FM que a pesar de ser una modulación de naturaleza analógica permitió familiarizarnos con el equipo USRP y el software Gnu Radio observando fenómenos para realizar ajustes que dieron inicio para la implementación de las modulaciones digitales.

En segunda instancia se realiza la simulación e implementación de los sistemas PSK y QAM, para esto se prueban e implantan diversos modelos encontrados en papers, trabajos de grado y foros de Gnu Radio, encontrando errores en la composición de sus bloques, en algunos casos faltantes o con parámetros de configuración de valores equivocados o calculados para hardware distintos al utilizado en el trabajo en particular la USRP1, debido a la ardua investigación se encuentra un blog donde muestra los esquemas y algunas observaciones para la implementación de la transmisión y recepción de un archivo de audio digitalizado para Gnu Radio utilizando equipos USRP⁴. Este modelo se acondiciona para las modulaciones y demodulaciones 2psk, 4qam, 8psk y 16qam.

³ PINAR DOMINGUEZ, Iván y MURILLO FUENTES, Juan José. Laboratorio de comunicaciones digitales Radio definida por Software. [en línea] Departamento. Teoría de la señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla, 2011. p 12 [consultado: 11 de abril de 2017] Disponible en internet: <http://alojoptico.us.es/murillo/LibroSDRV7USv8.pdf>.

MONTOYA, Ronal. Implementación de moduladores digitales QAM, PSK, GMSK, y GFSK con GNU Radio y el USRP NI 2900. [en línea]. Medellín blog Ronal Montoya's (7 de enero de 2018). [consultado: 16 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://rdmontoya.wordpress.com/2018/01/07/implementacion-de-moduladores-digitales-m-qam-m-psk-gmsk-y-gfsk-con-gnu-radio-y-el-usrp-ni-2900/>

1. ANTECEDENTES

Gracias a que la gran mayoría de sistemas de comunicación actuales se basan en la transmisión digital contamos con una extensa documentación que relaciona trabajos enfocados en los sistemas SDR, a continuación, presentamos algunos de ellos.

En el 2013 en la School of Electrical Engineering Aalto University de Finlandia se realizó la implementación TD-LTE en la radio definida por Software en el procesamiento de propósito general, esta investigación se basa en la utilización de USRP para realizar cambios de software en la transmisión y evitar el cambio de hardware⁵

En el año 2014 la universidad Industrial de Santander⁶, realizó una investigación sobre la caracterización de la plataforma de radio definida por software USRP en un rango de frecuencias de 50Mhz a 2200Mhz, la idea principal de esta investigación era determinar la relación de potencia de salida respecto a la variación de frecuencias y la relación en la variación de constantes de configuración empleadas en el software Matlab, LabVIEW y Gnu-radio.

En el año 2014 existen métodos de detección de energía, la universidad militar nueva Granada gracias a sus investigaciones y resultados se dan cuenta que pueden existir señales no deseadas que pueden causar interferencias o ruidos que estarán en el mismo nivel de señal de trabajo. Para poder desarrollar estas investigaciones basadas en la detección de espectro de energía y ancho de banda se utilizarán el software Gnu-radio y la tarjeta USRP todo esto con el fin de realizar la detección de falsas alarmas y detección de fallas con respecto a la comparación tradicional de energía⁷

⁵ KERTTULA, Jussi, et al. Implementing TD-LTE as software defined radio in general purpose processor. [en línea]. En: Proceedings of the 2014 ACM workshop on Software radio implementation forum. Chicago, Illinois, USA. Agosto 18-18 de 2014, p. 61-68. [consultado: 05 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: http://delivery.acm.org/10.1145/2630000/2627793/p61-kerttula.pdf?ip=200.3.193.133&id=2627793&acc=OA&key=4D9619BEF5D5941F%2EEEEE38388178DD50%2E4D4702B0C3E38B35%2E86AB6D2F1EF96FC0&_acm_=1541511139_821efbeaf7b7854d459c952346fc7f06

⁶ URIBE, José de Jesús, et al. Caracterización de la plataforma de radio definido por software USRP N210-WBX. [en línea] En: Revista GTI, 2013, vol. 12, no 34, p. 91-101. [Consultado: 06 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/3848/4202>.

⁷ ZHAO, Yanxiao, et al. Joint energy-and-bandwidth spectrum sensing with GNU radio and USRP. [en línea] En: ACM SIGAPP Applied Computing Review, Diciembre de 2014, vol. 14, no 4, p. 40-49. [Consultado: 15 de Mayo de 2017]. Disponible en Internet: http://delivery.acm.org/10.1145/2730000/2724932/p40-zhao.pdf?ip=200.3.193.133&id=2724932&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=4D9619BEF5D5941F%2EEEEE38388178DD50%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&_acm_=1541512430_a08f10807418c4250ccc0f376f30ad66

En el año de 2016 se desarrolló un enfoque experimental donde se desarrolla una mejora en la utilización del espectro para las redes de radio cognitiva, este experimento se desarrolló igual por la tarjeta USRP y por el software Gnu-radio en diferentes escenarios⁸.

En el año 2016 Chalmers University of Technology se realiza una investigación acerca de la implementación de tecnología en una plataforma de pruebas CRN (Radio Cognitiva de Redes) empleando Gnu-radio y USRP incluyendo el tiempo de conmutación y el rendimiento de la red⁹.

En el año de 2016 la universidad Autónoma de Occidente en conjunto con la universidad del valle desarrolló una investigación sobre los bloques para modulación en Gnu Radio el cual proporciona bloques eficientes de mapeo de símbolos, mapeo de complejos, modulación y demodulación QAM que permiten trabajar con constelaciones de diverso orden. Para comprobar su correcto funcionamiento, se emplearon constelaciones QAM con símbolos de 4 y 5 bits.¹⁰

En el año 2017 se desarrolla una red inalámbrica resistente con una arquitectura de comunicaciones basada en defensa de objetivos móviles y técnicas de radio definidas por software (SDR). Esta implementación se desarrolla en el entorno de Gnu Radio.¹¹

⁸ ZHAO, Yanxiao, et al. Experimental approach: two-stage spectrum sensing using gnu radio and usrp to detect primary user's signal. [en línea]. En: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on Applied Computing. Pisa, Italy. Abril 04-08 de 2016, p. 2165-2170. [consultado: 20 de junio de 2017] Disponible en Internet: http://delivery.acm.org/10.1145/2860000/2851824/p2165-zhao.pdf?ip=200.3.193.133&id=2851824&acc=CHORUS&key=4D9619BEF5D5941F%2EEED38388178DD50%2E4D4702B0C3E38B35%2E6D218144511F3437&_acm_=1541510486_a95d96f0acf1a472357452d5b1fa6402.

⁹ WANG, Haijun, et al. Self-adaptive network architecture reconfiguration in CRNs. [en línea]. En: Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Paderborn, Germany, Julio 05-08, ACM, 2016. p. 355-356. [Consultado: 22 de junio de 2017]. Disponible en Internet: http://delivery.acm.org/10.1145/2950000/2942396/p355-wang.pdf?ip=200.3.193.133&id=2942396&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=4D9619BEF5D5941F%2EEED38388178DD50%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&_acm_=1541513263_f191103ba40b6ba51997e87415abe8a8

¹⁰ ARBOLEDA MOLINA, Orlando. Diseño e implementación de un módulo eficiente modulador/ demodulador QAM para GNU Radio. [en línea] En revista Gerencia Tecnológica Informática. Cali, Colombia Sep-Dic. vol. 15, no. 43, p. 63-77. [Consultado: 04 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagi/article/view/6821/7125>

¹¹ FIRAS, Almoualem, et al. SDR-Based Resilient Wireless Communications. [en línea]. En: 2017 International Conference on Cloud and Autonomic Computing (ICCAC), Tucson, Arizona, USA, 2017, p. 114-119. [Consultado: 05 de enero de 2018]. Disponible en Internet: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8064059>

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde los inicios de las telecomunicaciones la tecnología ha avanzado de una forma muy rápida, en la actualidad las modulaciones analógicas AM y FM están relegadas a la radiodifusión, mientras que las modulaciones digitales como QAM y PSK se utilizan ampliamente en todo tipo de comunicaciones de datos cableadas e inalámbricas ya que permiten mejor calidad de transmisión, aumentar velocidad de transmisión y resultan más eficientes.

Las transmisiones digitales han tomado relevancia en diversos campos de las telecomunicaciones abarcando todas las aplicaciones que existen en este momento que son: domótica, ciudades inteligentes, comunicación internacional entre otras. Sin embargo, para realizar este tipo de aplicaciones debemos implementar diversas modulaciones digitales que para ello se debe realizar cambio de hardware a nivel total o parcial, por tal motivo las tecnologías SDR se hacen cada vez más importantes en la medida que evitan que cambios en la transmisión de datos impliquen necesariamente cambios en el hardware de los dispositivos y en su lugar solo sean necesarios cambios en el software.

En la actualidad existen sistemas de hardware y software que facilitan la implementación de modulaciones digitales capaces de realizar tareas que anteriormente serían imposibles de desarrollar solo con la variación de algunos parámetros. Para poder realizar este tipo de ejercicios contamos con una comunidad especializada que realizan diversas investigaciones por medio un software llamado Gnu Radio y hardware SDR llamado USRP, estas herramientas son de gran utilidad para estudiantes de telecomunicaciones y radio aficionados. Gnu Radio cuenta con una comunidad que se encarga de realizar publicaciones y demostraciones de los alcances que podemos obtener con estas herramientas.

La Mayor dificultad en este tipo de comunidades donde se comparten desarrollos en plataformas totalmente abiertas es que existen poca claridad y precisión en la documentación de los de los desarrollos y resultados de los experimentos, por tal motivo se ha creado la necesidad o la pregunta sobre la creación de un documento que sirva de guía y que tenga claridad en cuanto al diagrama y parámetros a modificar para obtener unos óptimos resultados en la implementación de transmisión y recepción de datos por medio de los sistemas SDR y Gnu Radio.

Por lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo implementar un sistema de transmisión digital con modulación de orden variable empleando

tecnología SDR que brinde soporte a procesos de investigación y docencia en el área de sistemas inalámbricos en la universidad Autónoma de Occidente?

2. JUSTIFICACIÓN

Abordar tecnologías como SDR, permiten el estudio y desarrollo rápido de nuevas técnicas y protocolos de transmisión inalámbricos que empleando plataformas de desarrollo de código abierto constituyen un punto importante para facilitar y promover el acceso a estos nuevos avances, actualmente la tecnología SDR se implementa en el espacio ya que las comunicaciones espaciales necesitan cada vez sistemas más flexibles, adaptables y de fácil configuración.

En el caso de las modulaciones digitales en particular, contribuir con la fundamentación y formalización de modelos que permitan emplear estas nuevas herramientas en forma eficiente contribuye a generar toda una base de conocimiento para generar instrumentos altamente flexibles tanto para la enseñanza como para la investigación, donde nuevos desarrolladores puedan implementar protocolos y tecnologías de transmisión más eficientes en los que la modulación sigue siendo una etapa esencial para su buen funcionamiento y desempeño.

Teniendo en cuenta que Gnu-Radio es un software Opensource (código abierto), está diseñado para realizar modificaciones desde la fuente del programa sin restricción de licencia, esto genera algunas diferencias en cada una de las aplicaciones expuesta por los participantes de la comunidad que ajustan sus variables de acuerdo con la necesidad que en el momento se presente. En cuanto a la información plasmada por cada uno de los integrantes a veces no es precisa, no dan información de su composición lógica y en algunos casos difusa para la implementación de los esquemas, por lo anterior surge la necesidad de crear un documento de forma ordenada y detallada donde se explicarán cada uno de los bloques y los parámetros que deben tenerse en cuenta en la implementación de modulaciones digitales por medio de software Gnu Radio y sistemas SDR.

Por otro lado, este proyecto puede dar el primer paso para el desarrollo de futuros desarrollos de investigación o implementaciones de sistemas inalámbricos de transmisión digital, dado que, por su bajo costo e implementación de equipos, podrían ser útiles para guiar algunas aplicaciones en las comunicaciones digitales. Por tanto, futuros investigadores pueden aprovechar este recurso para la implementación de desarrollo de nuevas aplicaciones en el ámbito universitario, investigativo y de nuestra cotidianidad para optimizar algunos procesos en nuestro entorno.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar los sistemas de modulación PSK y QAM de orden variable empleando tecnología SDR de código abierto como soporte a procesos de investigación y docencia en el área de sistemas inalámbricos.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar los modelos que permitan transmisión y recepción de datos empleando modulaciones PSK y QAM en entorno simulado
- Implementar los modelos que permitan transmisión y recepción de datos empleando modulaciones PSK y QAM en un entorno real en un canal inalámbrico por medio hardware SDR
- Ajustar los parámetros en los modelos realizados para lograr una comunicación óptima entre el transmisor y receptor SDR según las modulaciones seleccionadas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 MODULACION DIGITAL

Es la transformación de símbolos digitales en formas de ondas para realizar la transmisión por medio de una vía o canal de comunicación.

Existen diferentes tipos de modulación digital entre los más comunes son: PSK, QAM, ASK, MSK Y FSK. Una de las características de estas modulaciones es que en algunos casos se realiza variación de fase, amplitud y la frecuencia. A continuación, se hará una breve descripción de las modulaciones que emplearemos en nuestro proyecto.

4.1.1 PSK (Phase Shift Keying): Transmisión de desplazamiento de Fase, es una manera de modulación angular donde se realiza una modificación de fase para valores discretos limitados.¹² De acuerdo con el número de símbolos y su número de bits tenemos las siguientes modulaciones: BPSK: 2 símbolos y 1 bit, QPSK: 4 símbolos y 2 bits; 8PSK: 8 símbolos y 3 bits, entre otros.

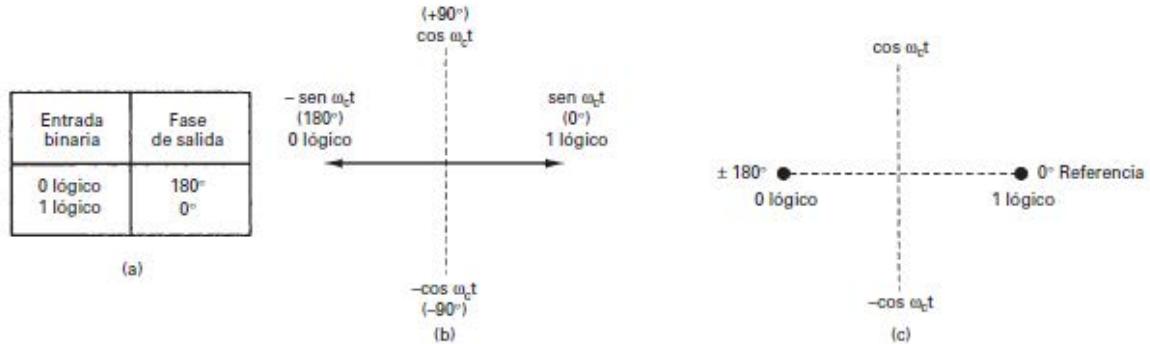
4.1.1.1 BPSK Transmisión por Desplazamiento de Fase Binaria, consiste en la variación de dos fases de salida para una frecuencia de la portadora. Los cambios de fase pueden ser 1 lógico o 0 lógico. La fase de la portadora puede estar en fase o desfasada 180 grados.¹³ Las modulaciones BPSK ocupan un ancho de banda mayor, además su velocidad es limitada, estas modulaciones son utilizadas generalmente en para LAN inalámbricas, RFDI y comunicación Bluetooth

En la figura 1 se muestra la tabla de verdad el diagrama fasorial y el diagrama de constelación de la modulación BPSK.

¹²ELECTRÓNICA FÁCIL. MODULACION DIGITAL: FSK-PSK-QAM [en línea]. electronicafacil.net [Consultado: 13 de junio de 2018] Disponible en Internet: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>

¹³ Ibid Disponible en Internet: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>

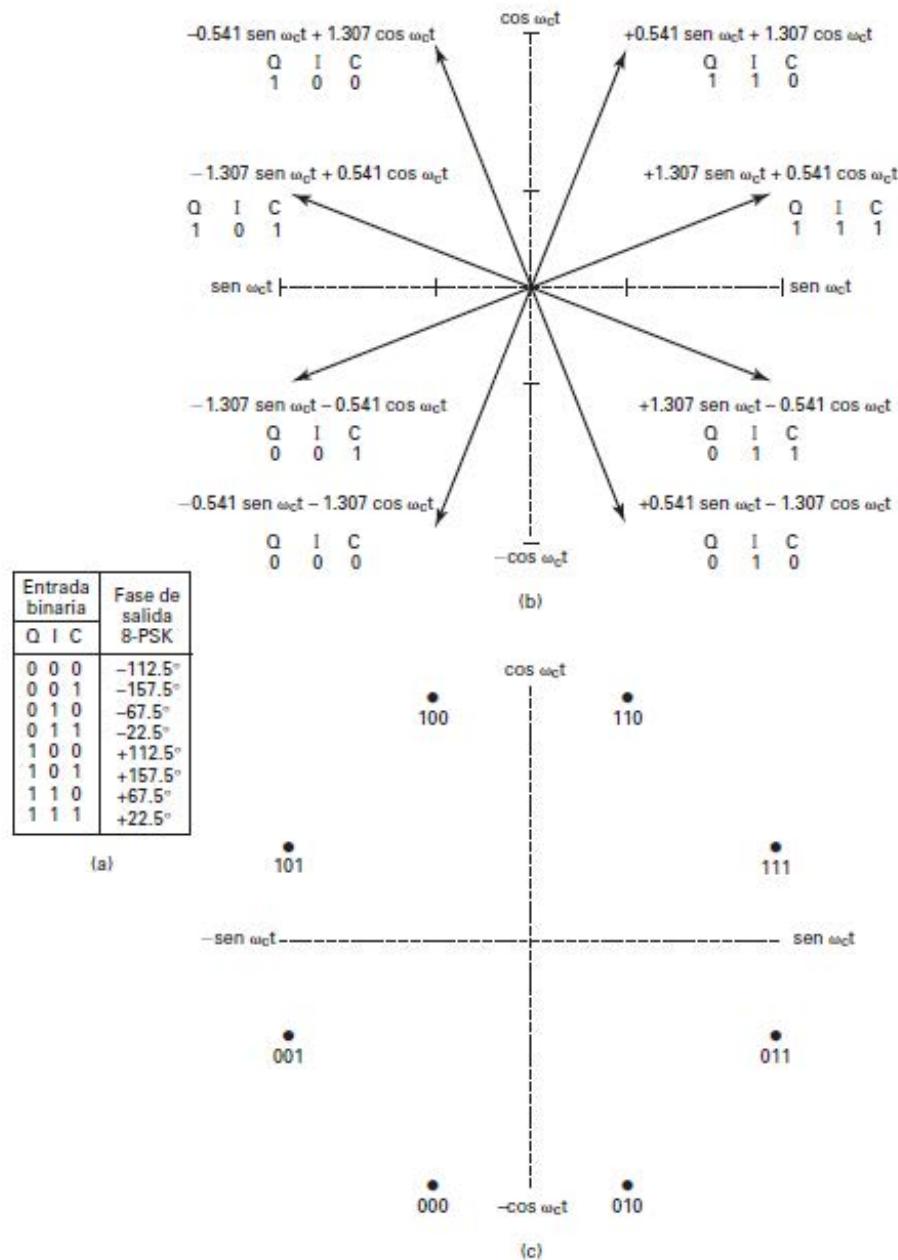
Figura 1 Modulador BPSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación



Fuente: TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pearson educación, 2003. p. 481.

4.1.1.2 8PSK es conocida como psk de ocho fases, como su nombre lo indica puede variar en 8 posibles fases de salida. A continuación, podemos observar en la figura 2 su tabla de verdad, la composición fasorial y su constelación.

Figura 2 Modulador 8-PSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación



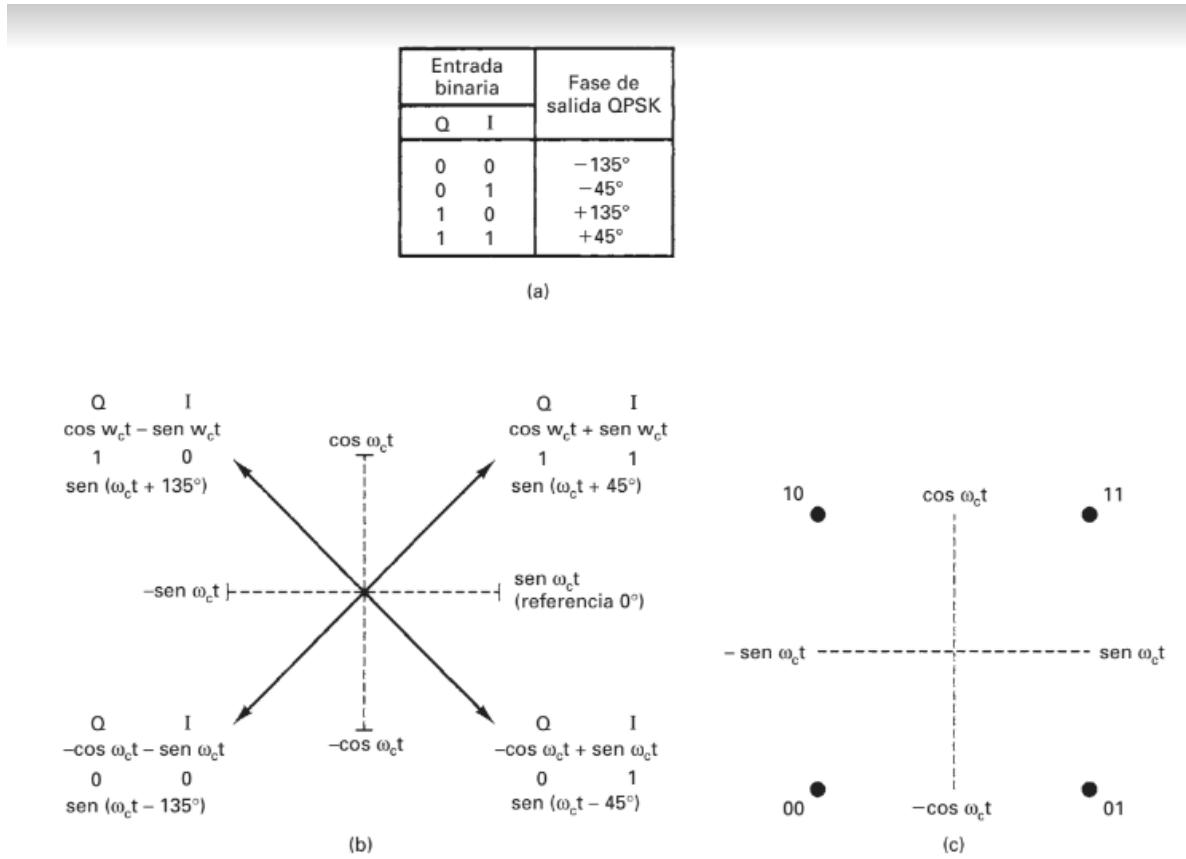
Fuente: TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pearson educación, 2003. p. 493.

4.1.2 QAM Es una forma de modulación digital, donde la información digital está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida, su principal ventaja es que gracias a que se pueden transmitir dos señales en una misma frecuencia, favorece en el aprovechamiento del ancho de banda disponible, mayor velocidad, se facilita la transmisión de datos para un número mayor de información en comparación con las modulaciones analógicas.

4.1.2.1 4QAM En algunas ocasiones es conocida como 4psk, las ondas de radio moduladas resultantes son exactamente las misma, ya que utilizan un diagrama de constelación equidistante alrededor de un circulo.¹⁴ A continuación se muestra en la figura 3 el modulador QPSK, su tabla y verdad, el diagrama fasorial y por último el diagrama de constelación, mismo comportamiento de 4QAM.

¹⁴ WIKIPEDIA. Phase Shift Keying [en línea] en.wikipedia.org [Consultado: 15 de junio de 2018] Disponible en Internet: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying

Figura 3 Modulador 4QAM, QPSK: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación



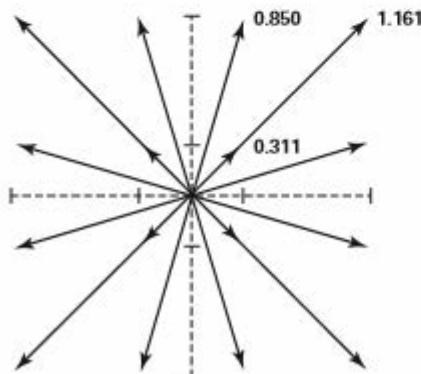
Fuente: TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pearson educación, 2003. p. 486.

4.1.2.2 16QAM Esta modulación cuenta con 16 posiciones en su constelación, su entrada es de 4 bits, actualmente se utilizan en aplicaciones de televisión digital. Manejan una velocidad mayor que las modulaciones 8psk, una de las desventajas es que son modulaciones con alta precisión de sincronía en el receptor digital.

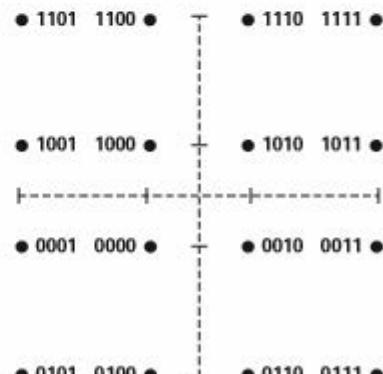
Figura 4 Modulador 16-QAM: (a) tabla de verdad; (b) diagrama fasorial; (c) diagrama de constelación

Entrada binaria				Salida 16-QAM	
Q	Q'	I	I'		
0	0	0	0	0.311 V	-135°
0	0	0	1	0.850 V	-165°
0	0	1	0	0.311 V	-45°
0	0	1	1	0.850 V	-15°
0	1	0	0	0.850 V	-105°
0	1	0	1	1.161 V	-135°
0	1	1	0	0.850 V	-75°
0	1	1	1	1.161 V	-45°
1	0	0	0	0.311 V	135°
1	0	0	1	0.850 V	165°
1	0	1	0	0.311 V	45°
1	0	1	1	0.850 V	15°
1	1	0	0	0.850 V	105°
1	1	0	1	1.161 V	135°
1	1	1	0	0.850 V	75°
1	1	1	1	1.161 V	45°

(a)



(b)



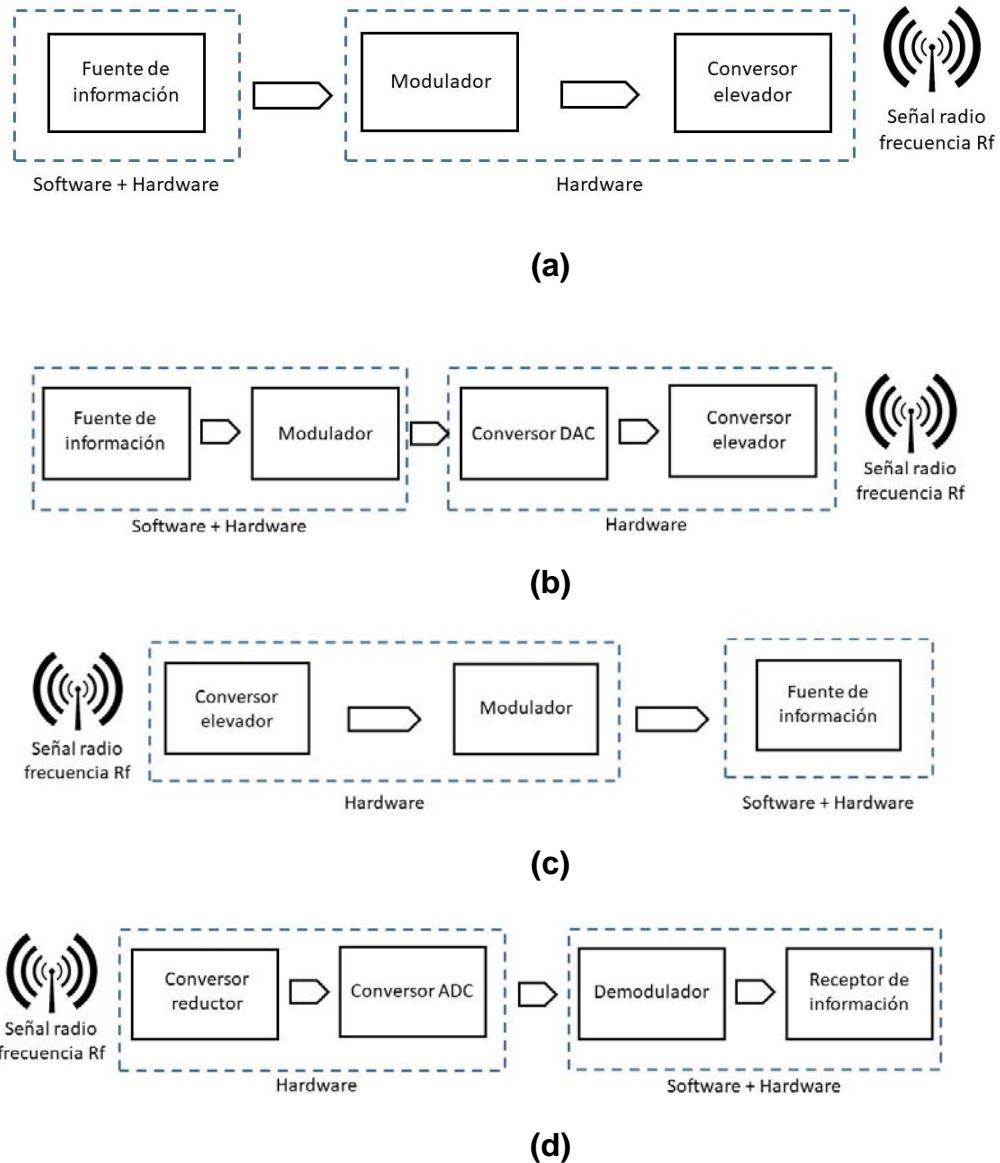
(c)

Fuente: TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pearson educación, 2003. p. 502.

4.2 SDR Radio definida por software, es un sistema de radiocomunicaciones que está diseñado por medio de componentes reemplazados por software, entre los elementos podemos encontrar filtros, mezcladores, amplificadores, entre otros, este tipo de características dan una gran flexibilidad para desarrollar sistemas de telecomunicaciones.

A continuación, se mostrará en la figura 5 un transmisor y receptor tradicional vs un transmisor y receptor SDR

Figura 5 Transmisor: (a) transmisor tradicional; (b) transmisor SDR; (c) receptor tradicional; (d) receptor SDR



Transmisor Tradicional: solo procesa la señal de la información por medio de software y el hardware, además el hardware debe ser específico de acuerdo con el

tipo de modulación a emplear. Lo que quiere decir que si se quiere cambiar de tecnología se debe realizar cambio de hardware.

Transmisor SDR: la modulación se realiza en software que corre sobre el mismo hardware que procesa la señal de información, además el hardware se comporta como genérico ya que en un solo hardware puede cambiar el tipo de modulación de tipo digital o analógica.

4.3 GNU RADIO

Es un software de código abierto que está diseñado para la creación de bloques para la implementación de sistemas SDR, cuenta con un ambiente de simulación totalmente especializado para recrear ambientes ideales en las radiocomunicaciones analógicas y digitales.

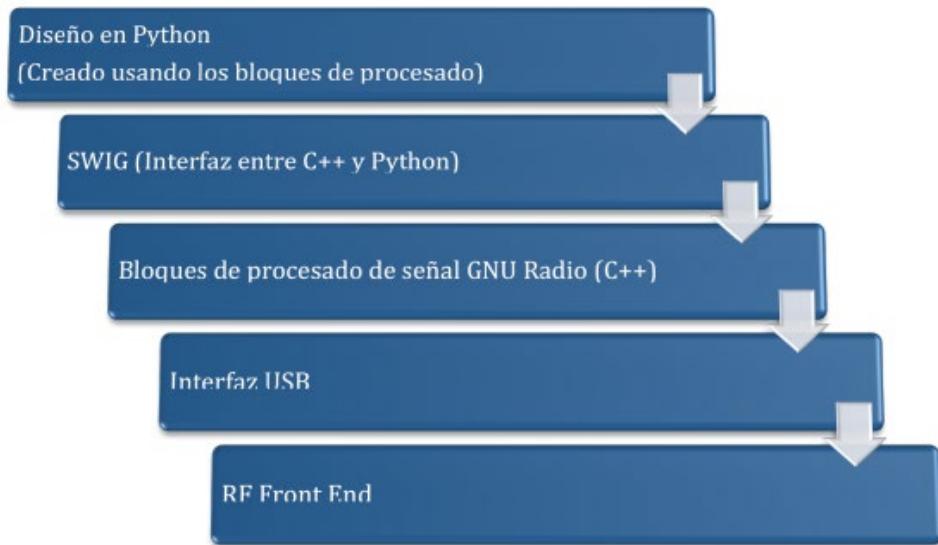
Gnu Radio está orientado para Radio aficionados, ambientes educativos y comerciales, esto con el fin de dar ayuda o soporte en investigaciones para las comunicaciones inalámbricas y sistemas de radio existentes en todas partes del mundo.

En cuanto a la construcción de la aplicación se basa en un entorno grafico Gnu Radio Companion o también puede desarrollarse por medio de lenguaje de programación Python. En un nivel más alto de rendimiento se implementa en lenguaje c++.¹⁵

A continuación, se muestra en la figura 6, la arquitectura de Gnu Radio.

¹⁵WIKIPEDIA. GNU Radio [En línea] es.wikipedia.org [Consultado 22 de Junio de 2018] Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio

Figura 6 Arquitectura Gnu Radio



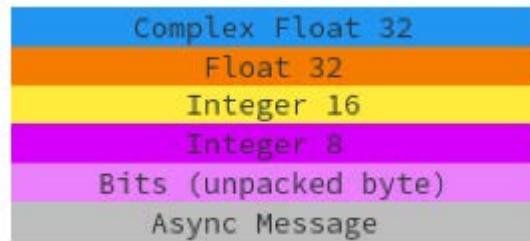
Fuente: PINAR, Domínguez. Laboratorio de comunicaciones digitales Radio Definida por Software. Universidad de Sevilla, 2011. p. 31.

Para poder entender los esquemas o bloques de nuestra implementación, se debe tener en cuenta que los módulos que no se encuentran con ningún hilo de conexión pueden ser de información del proyecto, variables creadas por el usuario o herramientas para la organización de gráficos en los resultados.

- Options: este módulo se utiliza para dar información sobre el nombre del proyecto y el nombre de la persona que realiza el esquema. Esto es opcional.
- Variable: como su nombre lo indica son las variables creadas por el usuario
- Wx GUI Notebook: este módulo se utiliza para dar orden de las gráficas mostradas en los resultados finales.

Por otro lado, un aspecto importante son los datos que se utilizan para cada módulo, se observa que cada módulo cuenta con una entrada de datos y una salida de datos, de acuerdo con el tipo de operación se pueden modificar, un ejemplo de ello es que en la entrada de un módulo entren bits y en la salida tengamos una cadena de caracteres. En la figura 11 se mostrará algunos de los códigos de colores más utilizados en Gnu Radio.

Figura 7 Código de colores datos utilizados en Gnu Radio

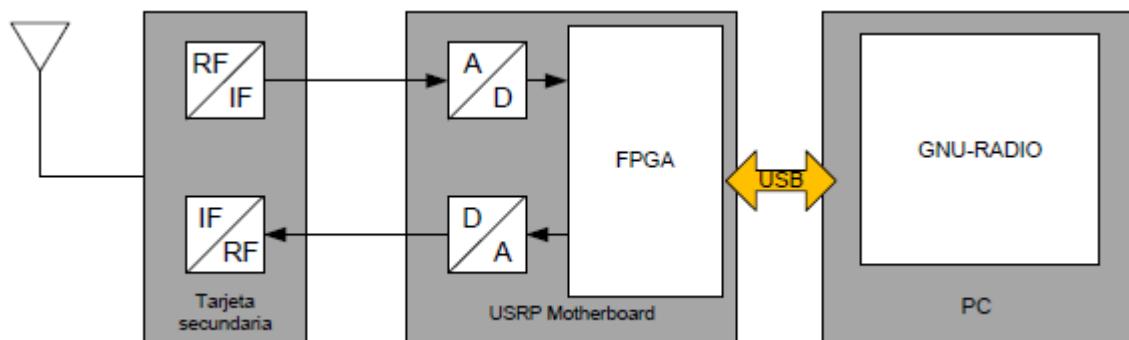


Para poder entender el funcionamiento de cada uno de los módulos se realizan tomas de las configuraciones que se deben tener en cuenta para la utilización de cada uno de ellos.

4.4 USRP

Es un hardware que está diseñado para realizar tareas de múltiples propósitos en las telecomunicaciones, este elemento funciona gracias a que cuenta con una tarjeta de procesamiento de datos que puede ser configurado como transmisor o receptor por medio de una computadora y un software llamado Gnu Radio entre otros. Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado la USRP1, sin embargo, hay muchos modelos disponibles con diferentes capacidades de procesamiento y ancho de banda no solo de Ettus Research¹⁶ sino también de otros fabricantes. En la figura 8 veremos el diagrama básico de la USRP

Figura 8 Diagrama básico del Universal Software Radio Peripheral



Fuente: PINAR, Domínguez. Laboratorio de comunicaciones digitales Radio Definida por Software. Universidad de Sevilla, 2011. p. 15.

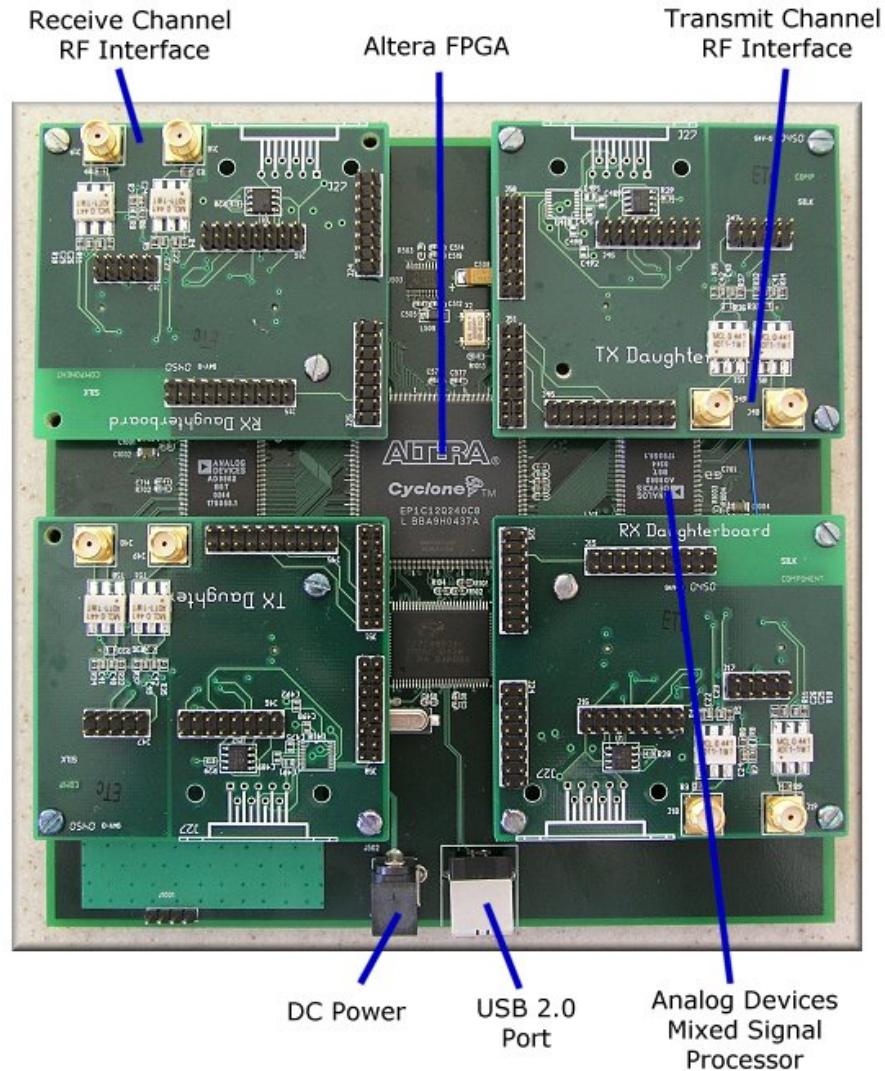
¹⁶ ETTUS RESEARCH, a national Instruments Brand. [en línea]. USPR1 [Consultado 10 de Junio de 2018] Disponible en Internet: <https://www.ettus.com/product/details/USRPPKG>

En cuanto a su arquitectura está compuesto por un Altera Cyclone FPGA, 64 MS / s de doble ADC, 128 MS / s de doble DAC y conectividad USB 2.0 para proporcionar datos a los procesadores host.

Para ejecutar el funcionamiento de la USRP1 debemos conectar su alimentación de voltaje, por otro lado, se debe conectar un cable USB 2.0 que es el encargado de realizar la comunicación con el pc donde se ejecutan las tareas a realizar por medio del software Gnu Radio. En la comunicación del hardware con el pc es indispensable la instalación de un controlador que se encuentra en la página oficial de Ettus Research. Para la transmisión y recepción de datos se debe utilizar una tarjeta secundaria, en este caso la tarjeta que se utiliza es la RX900 diseñada para trabajar en la frecuencia de 900Mhz, actualmente la universidad Autónoma de Occidente cuenta con dos modelos de tarjetas secundarias que son RF2400 que funciona en la banda de los 2400Mhz y la antes en mención la tarjeta RX900. La decisión de utilizar esta tarjeta la tarjeta RX900 es que la tarjeta RF2400 utiliza una banda de frecuencia donde se presenta mayor nivel de ruido y eso dificulta los experimentos.

En la figura 9 se mostrará una fotografía correspondiente a un modelo de la USRP

Figura 9 Fotografía interior USRP



Fuente: Anónimo. [Fotografía]. En: Technische Universität München. Alemania. 26 de mayo de 209. [Consultado: 05 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://campar.in.tum.de/Students/SepEvaluationofSoftwareDefinedRadioforParasiticTracking>

La USRP1 tiene las siguientes características:

Capacidades de hardware:

- 2 ranuras para tarjetas transceptoras
- Frecuencia de reloj fija de 64 MHz
- Capacidades de FPGA:
 - 2 cadenas RX DDC en FPGA
 - 2 cadenas TX DUC en FPGA (sin TX CORDIC -> usa DAC)
 - modos de muestra sc16 - RX y TX
 - Hasta 8 MHz de RF BW con muestras de 16 bits
 - modo de muestra sc8 - solo RX
 - Hasta 16 MHz de RF BW con muestras de 8 bits

5. METODOLOGÍA

El método de investigación realizado en nuestro proyecto se basa en el método analítico, esto con el fin de ir desglosando cada parte que compone una modulación digital. Para realizar esta investigación se realizó el análisis de papers, videos, revistas, artículos y demás información que pudiera dar el conocimiento general y técnico para la implementación de modulaciones digitales con sistemas SDR. Adicional a esto se debe realizar una serie de laboratorios en escenarios simulados y en base a los resultados se realiza la implementación final de la modulación. Se documenta y se toman muestras de los resultados y por último se realiza un análisis de todos los acontecimientos:

5.1 ETAPAS DEL PROYECTO

Etapa 1. Simulación de transmisión de datos: Realizar la transmisión de datos simulados por medio de las modulaciones PSK y QAM por medio de software Gnu-radio, creando un modelo compuesto por bloques.

Realizar por medio de software Gnu-radio que permite a través de bloques crear la estructura para realizar la transmisión y recepción de datos por medio de las modulaciones QAM Y PSK, en esta plataforma se podrá observar la constelación generada tanto en la modulación como en la demodulación en el sistema. Además, permitirá tener una percepción más clara de la energía y ancho de banda utilizada en él envío de datos.

Etapa 2. Transmisión inalámbrica de datos en un canal de radiofrecuencia: Realizar por medio de software Gnu-radio y la tarjeta multifuncional USRP la transmisión y recepción de datos en un entorno real.

Realizar un modelo compuesto por bloques que difiere en algunas partes del modelo simulado por medio del software Gnu-radio todas las parametrizaciones correspondientes para hacer funcionar la usrp para transmitir por medio de ella y de forma inalámbrica los datos modulados por software. Por Gnu-radio nos permitirá monitorear todos los eventos que ocurren en la usrp, adicional se podrá obtener el grafico de la señal modulada y de modulada, lo anterior nos permitirá a la hora de realizar el mantenimiento al sistema, tener la información necesaria para poder identificar el problema de una forma más sencilla y eficaz.

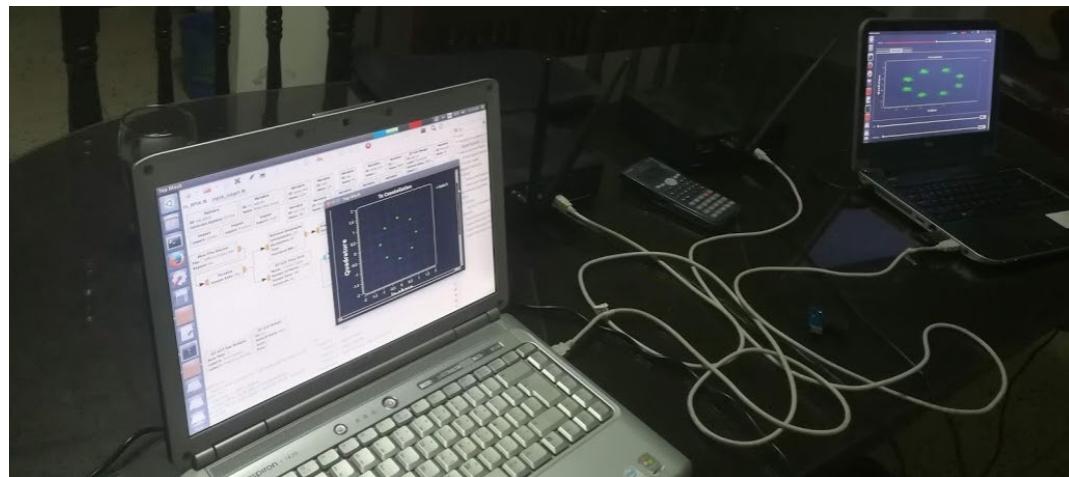
Etapa 3. Documentación técnica: Realizar un documento técnico donde se detallarán los resultados obtenidos, los bloques empleados y sus parámetros óptimos para el funcionamiento de la transmisión y recepción QAM y PSK

Se realizará una documentación especificada de cada uno de los bloques utilizados en Gnu-radio, para transmisión y recepción de datos y los parámetros utilizados para la usrp y la transmisión inalámbrica. En dicho documento se explicará detalladamente cada uno de los parámetros y se evidenciará cada uno de los resultados obtenidos con dichos bloques.

6. RESULTADOS

Se debe tener en cuenta que todos los experimentos o laboratorios realizados en este proyecto se realizan en un entorno Linux Ubuntu, para ejecutar este sistema operativo fue montado por medio de una USB buteable donde se encuentra instalado el software Gnu Radio y por otro lado se realiza la instalación adicional del controlador para USRP1. En la figura 10 se muestra el montaje realizado para la conexión de equipos y la modulación de 8psk en tiempo real. Se realiza la implementación de un sistema transmisor-receptor de FM como tarea de aprendizaje para comprender el funcionamiento de la USRP1 y sus variables de configuración. (Ver Anexo A)

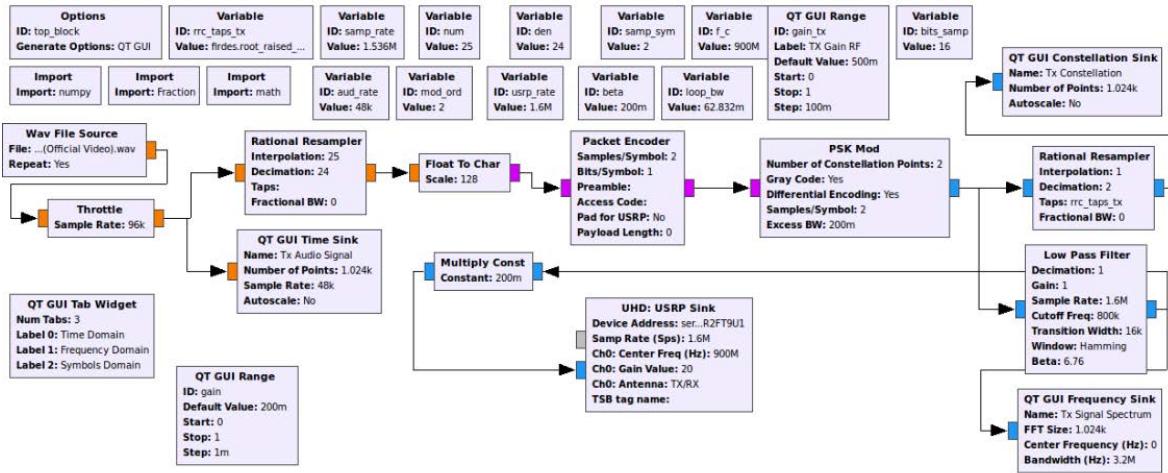
Figura 10 Foto Montaje equipos



6.1 MODULACIÓN BPSK

En esta modulación se generan 2 puntos en su constelación, el diagrama general del transmisor para modulaciones BPSK se muestra en la figura 11, para realizar esta modulación solo se utilizan dos símbolos por bit.

Figura 11 Diagrama de Bloques Transmisor BPSK



Para poder entender el diagrama mostrado en la figura 11 explicaremos cada uno de sus componentes en cuanto a variables utilizadas y los módulos que representan cada uno de ellos.

Variables y librerías:

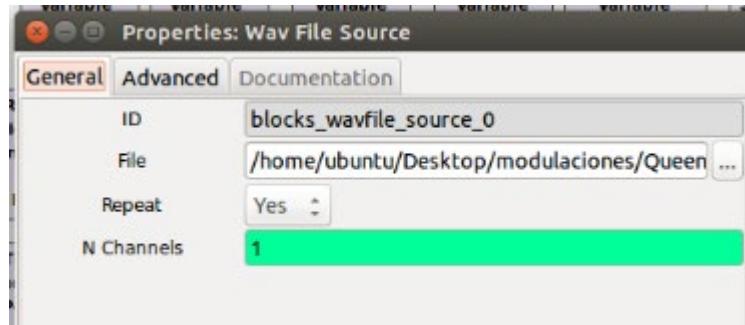
- `rrc_taps_tx`: Es un filtro digital que sirva para eliminar el ruido blanco.
- `Samp_rate`: Es la frecuencia de muestreo que requiere el archivo; `int(aud_rate*bits_samp*sam_sym/math.log(mod_ord,2))`
- `num`: Es una variable que por medio de la librería Fraction obtiene el valor de interpolación necesario para el ejercicio; `int (Fraction (usrp_rate, samp_rate). numerator)`
- `den`: Es una herramienta para obtener el valor de diezmado necesario para el ejercicio; `int (Fraction (usrp_rate, samp_rate). denominator)`

- numpy: librería utilizada para filtros digitales.
- Math: librería para realizar operaciones matemáticas.
- Aud_rate: Es la frecuencia para la tarjeta de audio del computador, en este caso se utiliza 48Khz.
- mod_ord: el orden de la modulación, en este caso es 2.
- Ursp_rate: Es el ancho de banda que se necesita para enviar el archivo, esto se debe a que la USRP tiene una frecuencia de muestreo 128Mhz, por lo tanto, debe ser adecuado para poder realizar el procesamiento de los datos en conjunto con Gnu Radio, el dato que se requiere para esta variable debe ser mayor o casi igual al samp_rate y además deben ser números enteros; int(128e6/80).
- Beta: coeficiente para el ancho de banda, no debe ser mayor a 1
- loop_bw: se refiere al punto de 3dB
- Samp_sym: Es el número de muestras por símbolo que requiere la modulación, se aconseja que no debe exceder 4 muestras por símbolo, debido a que se introduce demasiado ruido.
- f_c: es la frecuencia utilizada para la modulación en este caso se trabajó con 900Mhz, ya que la tarjeta secundaria es una FX900.
- bits_samp: es el número de bits por muestra
- gain: Es la ganancia de la tarjeta secundaria para la transmisión de los datos.

A continuación, se explican los módulos que hacen parte de la modulación BPSK:

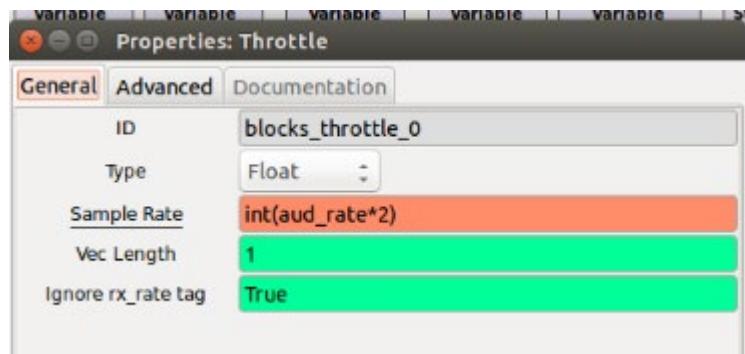
6.1.1 Wav File Source: Es el encargado de cargar el archivo de audio, para este caso se utilizó una canción de Queen. En la figura 12 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 12 Parámetros Wave File Source



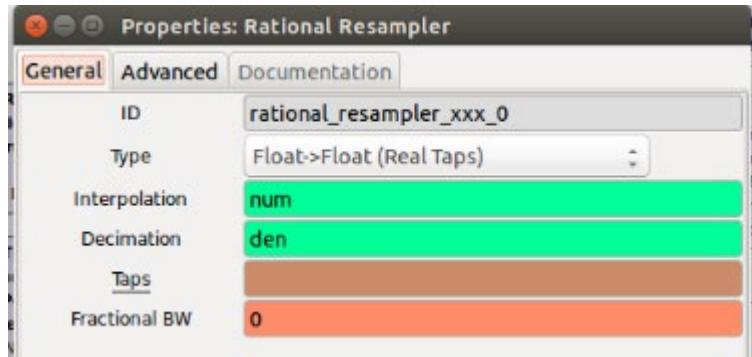
6.1.2 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida. En la figura 13 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 13 Parámetros Throttle



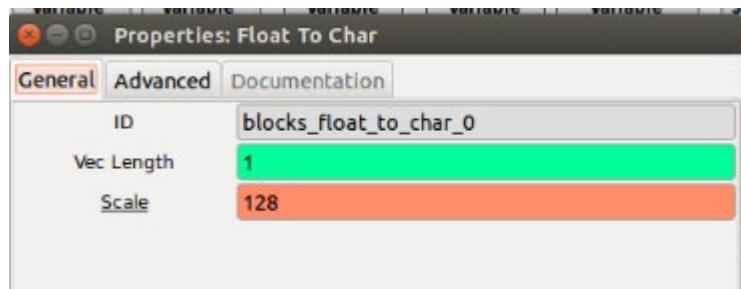
6.1.3 Rational Resampler: muestreador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia de muestreo del archivo de audio y la tasa de muestreo que necesita el upconverter del ursp. Upconverter necesita recibir múltiplos de 128 muestras por segundo (MPS). En la figura 14 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 14 Parámetros Rational Resampler



6.1.4 Float To Char: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles. Según el buscador Wikipedia la definición es “Cuantificación digital: El proceso de cuantificación digital es posterior a la etapa de muestreo en la que se toman valores de amplitud de una determinada señal analógica. El objetivo de este proceso es cuantificar con bits éstos valores, mediante la asignación de niveles. En esta etapa se le asigna un valor a la muestra, pero no es digital. En este punto se decide si el valor de la muestra está, por aproximación, dentro del margen de niveles previamente fijados y se le asigna un valor preestablecido según el código utilizado en la codificación”¹⁷ En la figura 15 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 15 Parámetros Float To Char

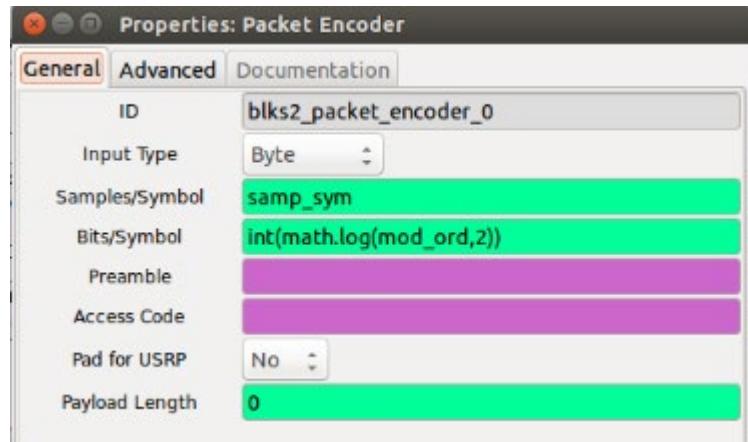


6.1.5 Packet Encoder: codificador de paquetes. Se encarga de fragmentar en cada dato tipo char a la salida un número de bits indicado por la variable bits/sym de cada byte que ingresa. La variable samp/sym se encarga de entregar ese número de

¹⁷WIKIPEDIA. Cuantificación digital [en línea] es.wikipedia.org [Consultado 30 de Junio de 2018] Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_digital

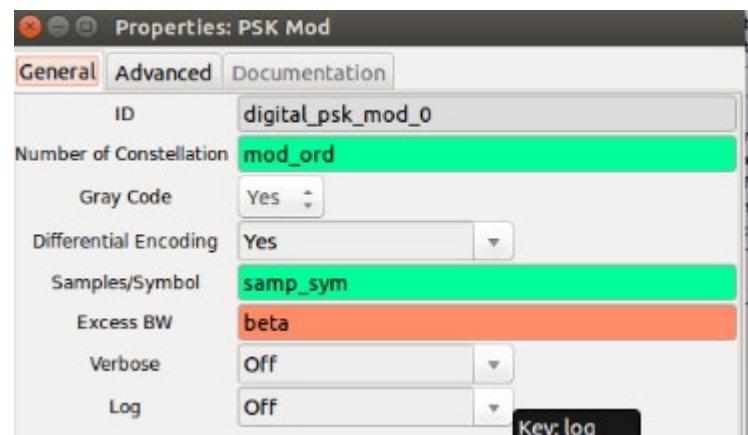
muestras por símbolo de entrada, en este caso se están duplicando los símbolos que ingresan. En la figura 16 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 16 Parámetros Packet Encoder



6.1.6 PSK Mod: Es el encargado de la modulación en PSK; Number of Constellation: es el grado de la constelación en esta ocasión es 2 por ser modulación BPSK; Samples/Symbol: Numero de muestras por símbolo generalmente se utilizan dos muestras; Excess BW: Es la beta del filtro. En la figura 17 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 17 Parámetros PSK Mod



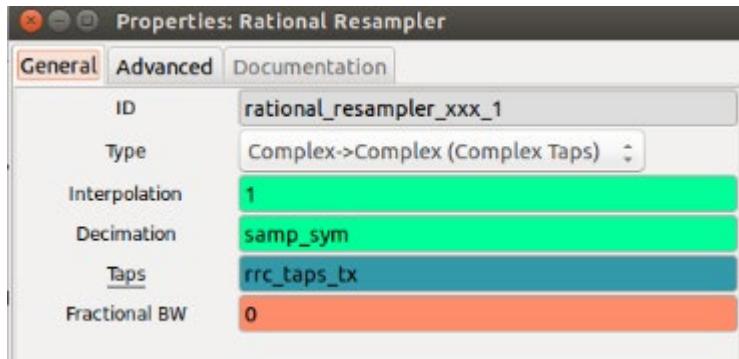
6.1.7 Low Pass Filter: Es un filtro pasa bajo, se decide filtrar las muestras antes de enviarlas a la USRP. En la figura 18 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 18 Parámetros Low Pass Filter



6.1.8 Rational Resampler: se encarga de enviar 1 símbolo por muestra para observar en la ventana de constelación. En la figura 19 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

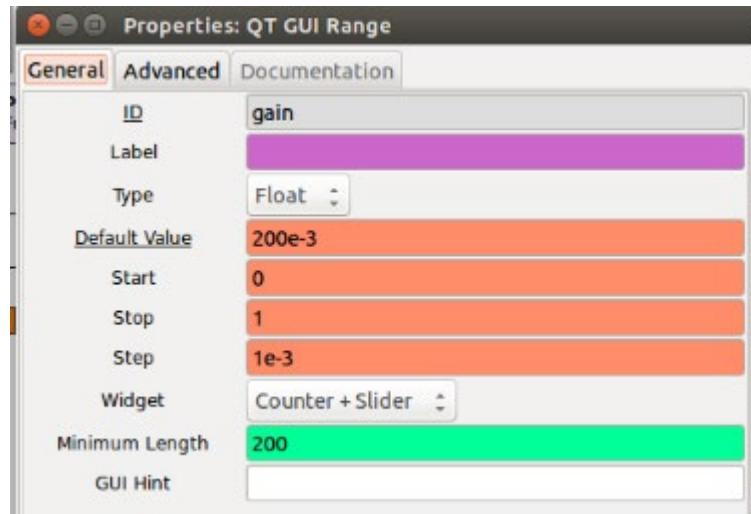
Figura 19 Parámetros Rational Resampler



6.1.9 Multiply Const: Es la ganancia que regula a la tarjeta secundaria, para la transmisión de los datos, este módulo fue vital para poder realizar los laboratorios, en gran parte del tiempo se realizaron pruebas sin este módulo y la respuesta fue nula, debido a que estaba saturando su ganancia y por lo tanto solo obteníamos

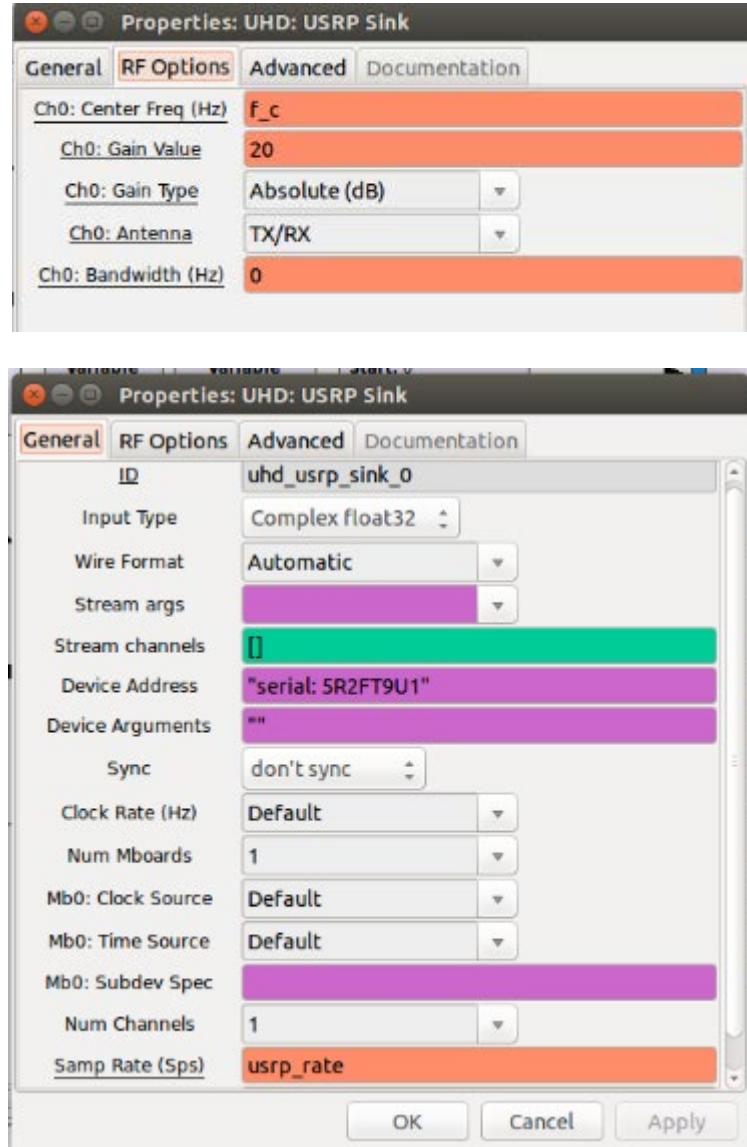
ruido en la recepción. En la figura 20 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo, la imagen mostrada es la variable que se crea para modificar la ganancia para este módulo.

Figura 20 Parámetros QT Gui Range



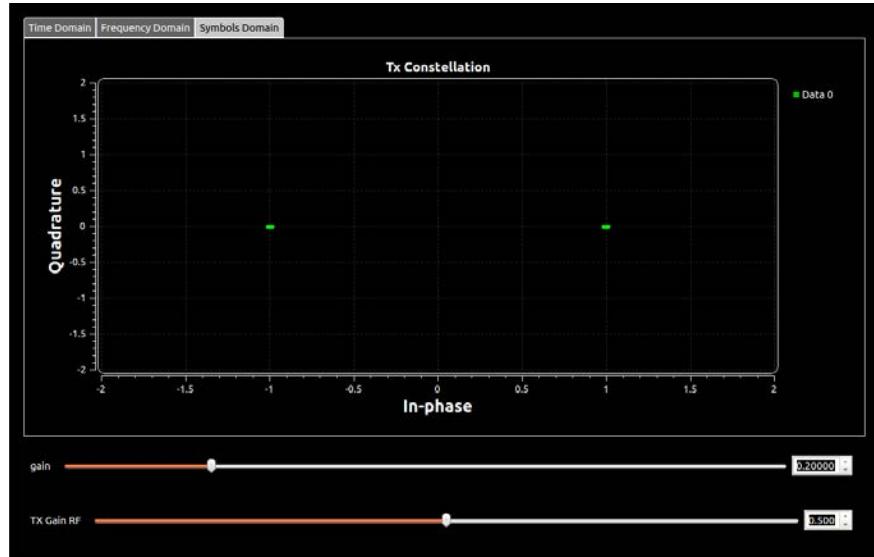
6.1.10 UHD URSP Sink: Es el encargado recibir los parámetros para acondicionar las señales de la tarjeta madre. Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En figura 21 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 21 Parámetros UHD: USRP Sink



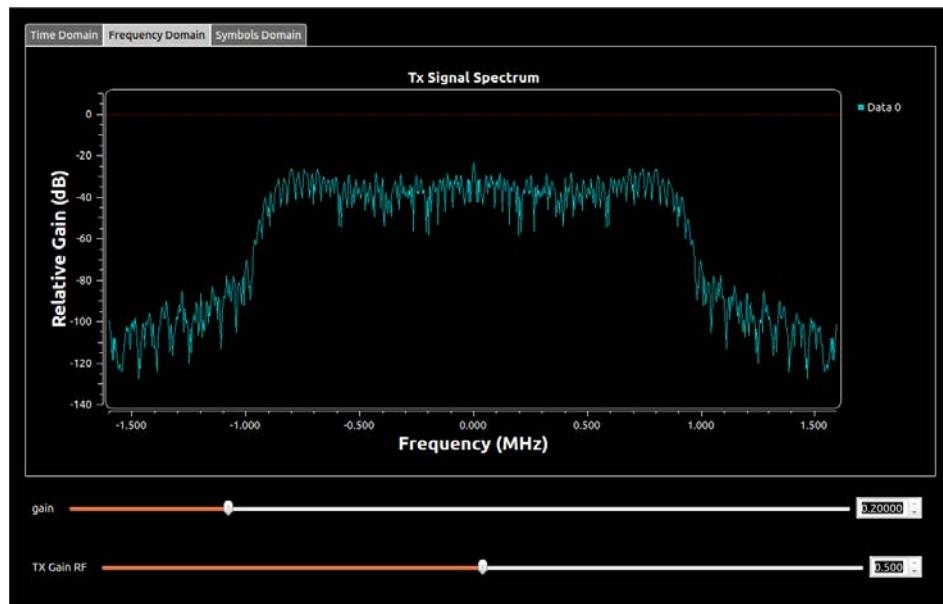
En la figura 22 muestra la constelación BPSK, como se puede observar los puntos de constelación están completamente definidos, además se encuentran separados el uno del otro 180° .

Figura 22 Constelación modulación BPSK



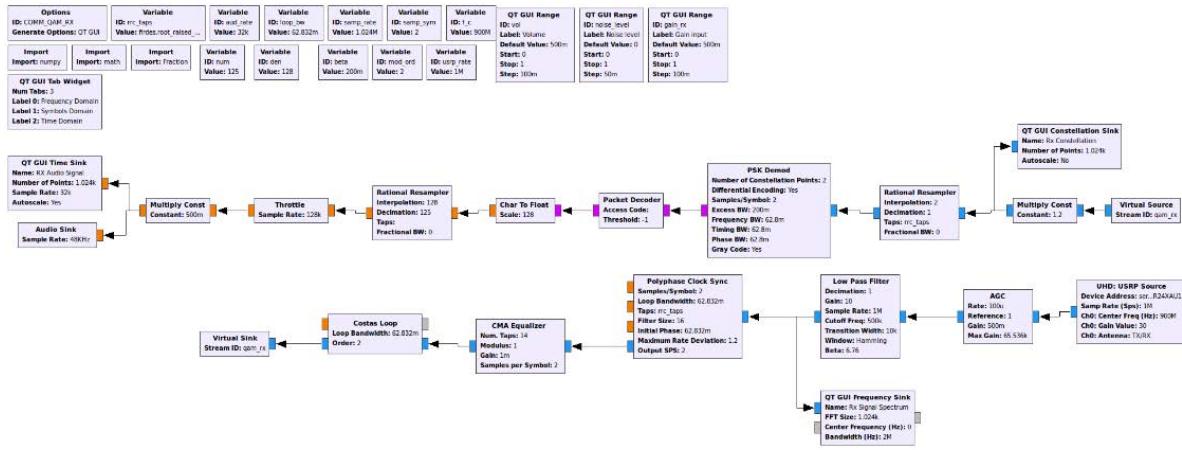
En la figura 23 muestra la gráfica que corresponde al espectro generado por la modulación BPSK, en ella se observa la ganancia en decibeles y la frecuencia transmisión.

Figura 23 Espectro modulación BPSK



6.1.11 Demodulación BPSK En este apartado mostraremos el esquema que corresponde a la demodulación BPSK y se explicaran sus módulos.

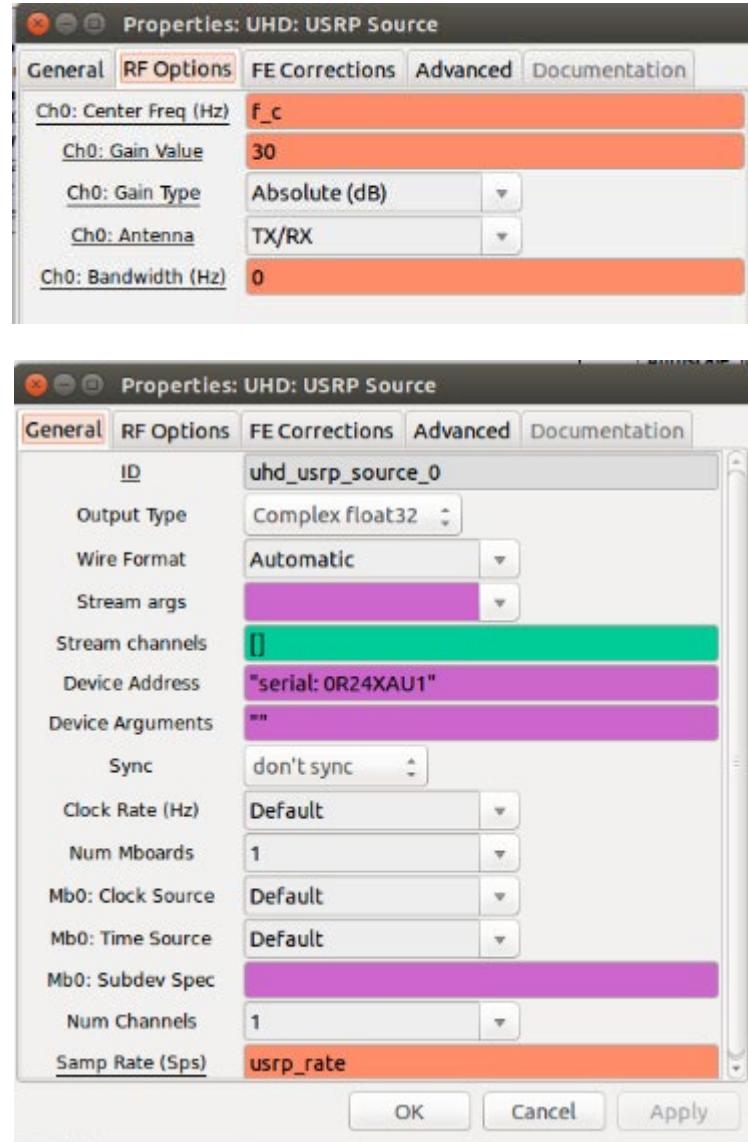
Figura 24 Diagrama de Bloques Receptor BPSK



Como se observa en la figura 24 el esquema del demodulador es muy similar al implementado en el transmisor, la variante es que los módulos cambian, es decir se invierten en su posición, por otro lado, para el bloque demodulador se adicionan unos cuantos bloques para poder obtener los resultados satisfactoriamente.

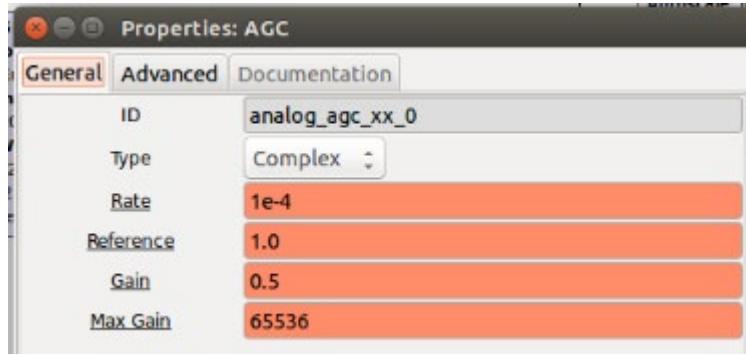
6.1.12 UHD: URSP Source: se trata del módulo inicial que es el encargado de capturar la información para ser procesada por el software Gnu Radio. Los parámetros más relevantes son: Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En la figura 25 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 25 Parámetros UHD: USRP Source



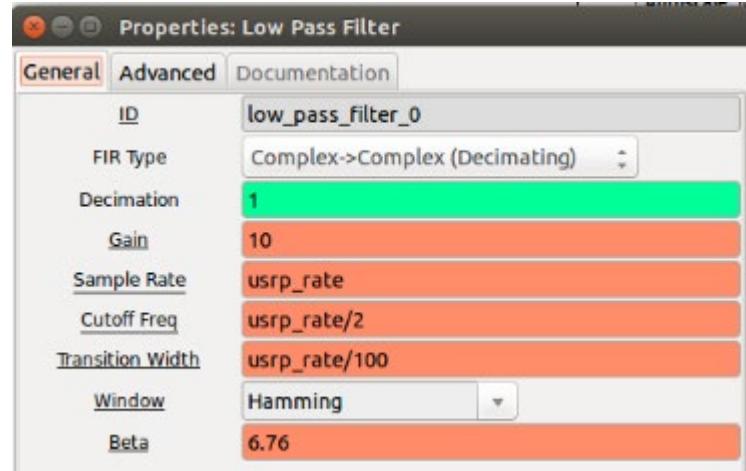
6.1.13 AGC: Control Automático de Ganancia. Es la encargada de variar la ganancia con respecto al nivel de señal que se recibe. En la figura 26 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 26 Parámetros ACG



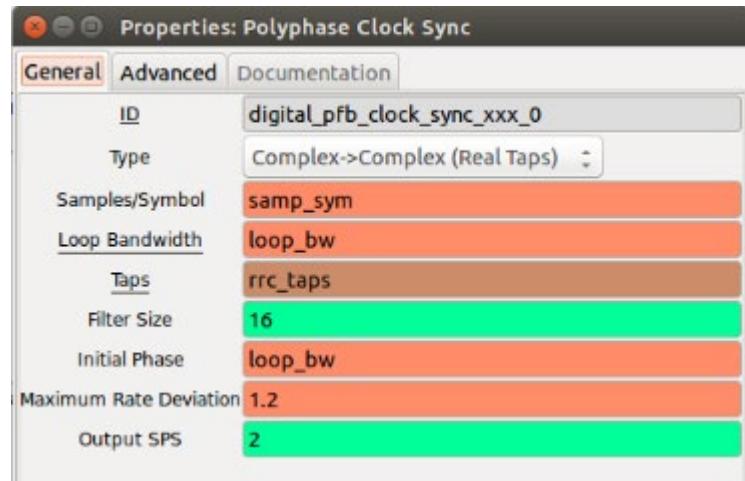
6.1.14 Low Pass Filter: la señal debe de ser acotada en el dominio de la frecuencia, así como evitar que tome otras señales en el espectro que no estamos esperando. En la figura 27 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 27 Parámetros Low Pass Filter



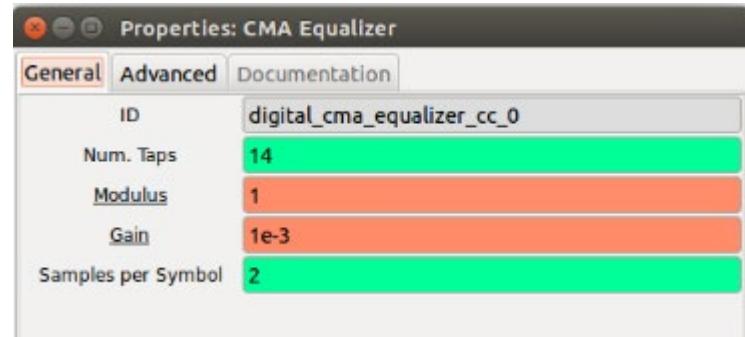
6.1.15 Polyphase Clock Sync: Arreglo de filtros polifase para sincronización de símbolos entre transmisor y receptor. Estos filtros son del tipo raíz coseno alzado, por ende, acá ya se realiza la conformación de símbolos antes de la detección en el demodulador. Acá se decima por 2 con el fin de ajustar mejor la sincronización. En la figura 28 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 28 Parámetros Polyphase Clock Sync



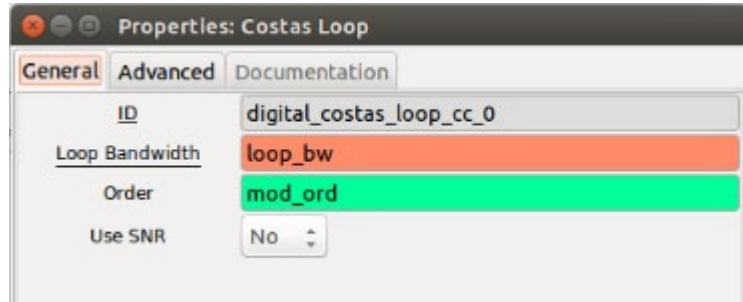
6.1.16 CMA Equalizer: ecualizador de módulo constante. Este es necesario para igualar la amplitud de todos los símbolos. Este tipo de ecualizador es funcional solo en modulaciones de fase. En la figura 29 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 29 Parámetros CMA Equalizer



6.1.17 Costas Loop: Se encarga de mantener la frecuencia de la portadora. En la figura 30 se muestra la configuración para este módulo.

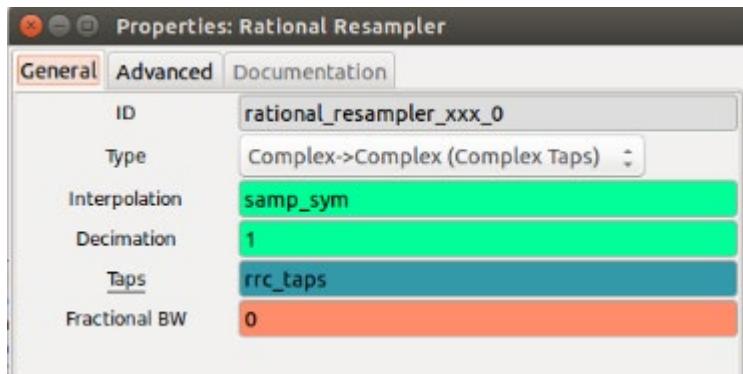
Figura 30 Parámetros Costas Loop



6.1.18 Multiply Const: Esta ganancia se utiliza para ampliar la señal que recibe del costas Loop.

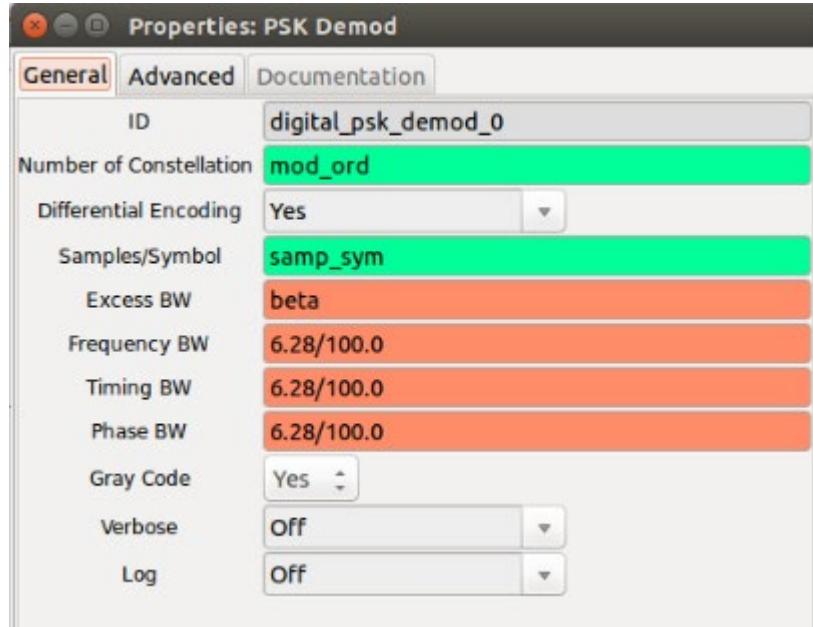
6.1.19 Rational Resampler: este se justifica debido a que la señal se diezma por 2 en el filtro polifase, entonces para recuperar adecuadamente los símbolos en el demodulador PSK, se necesita duplicar los símbolos de nuevo, además se introduce un filtro rrc_taps. En la figura 31 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 31 Parámetros Rational Resampler



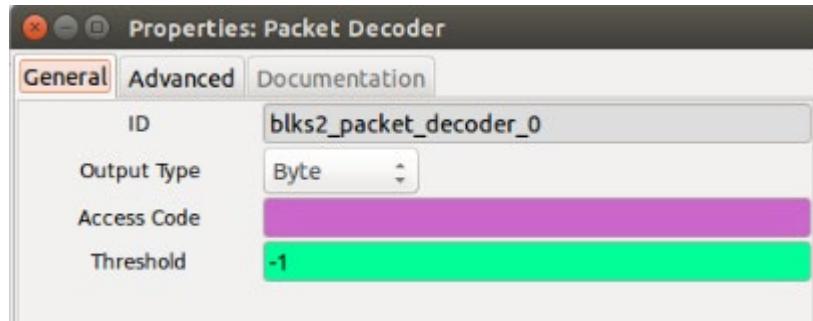
6.1.20 PSK Demod: Demodulador PSK Es el encargado de recuperar la información. En la figura 32 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 32 Parámetros PSK Demod



6.1.21 Packet Decoder: Es el decodificador de paquetes. En la figura 33 se muestra la configuración de este módulo

Figura 33 Parámetros Packet Encoder

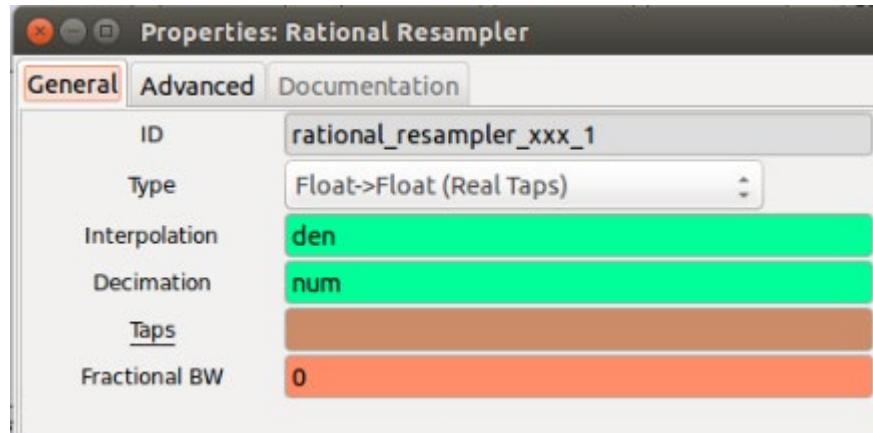


6.1.22 Char To Float: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles.

6.1.23 Rational Resampler: muestreador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia del upconvert del USRP a la frecuencia de muestreo del

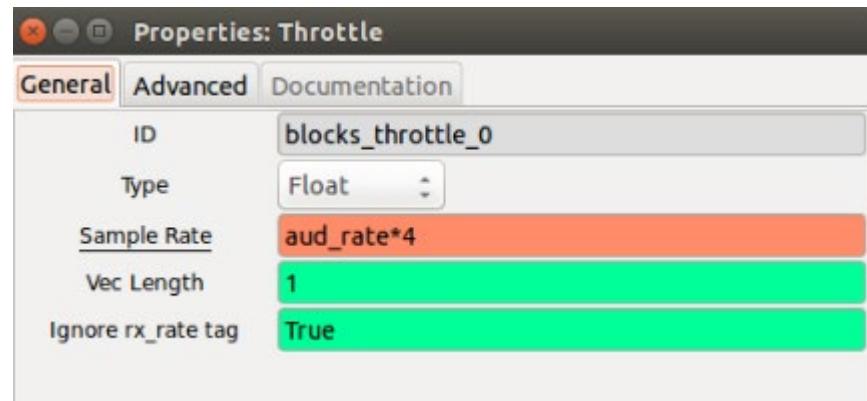
archivo de audio. En la figura 34 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 34 Parámetros Rational Resampler



6.1.24 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida, el muestreo debe ser el doble del modulador. En la figura 35 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

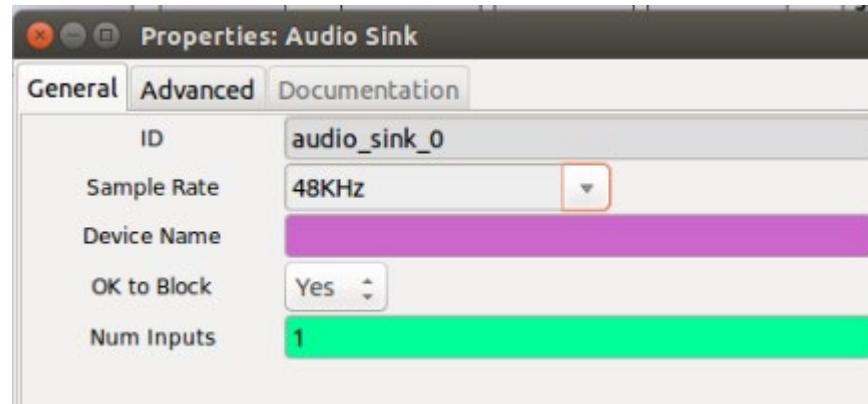
Figura 35 Parámetros Throttle



6.1.25 Multiply Const: Es la ganancia para el volumen de la canción a reproducir.

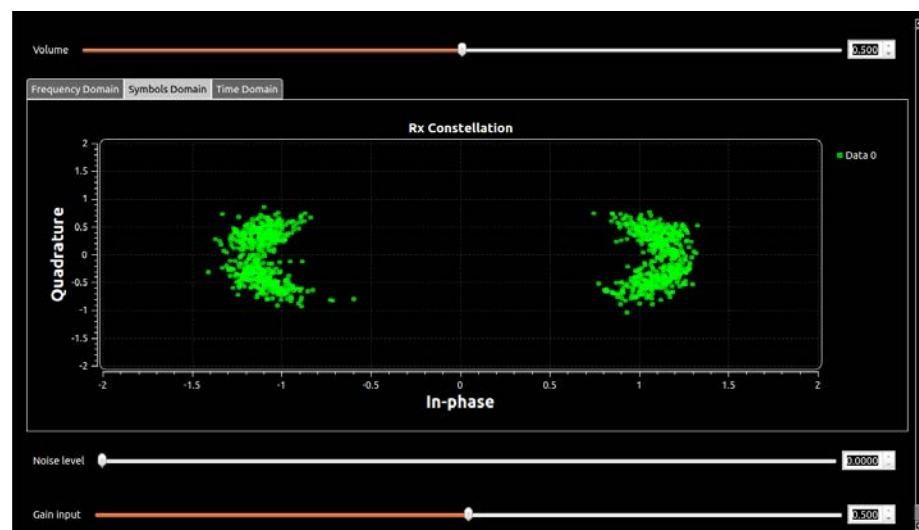
6.1.26 Audio Sink: Es el encargado de reproducir el archivo en la frecuencia de 48Khz. En la figura 36 se muestra la configuración de parámetros para este módulo.

Figura 36 Audio Sink



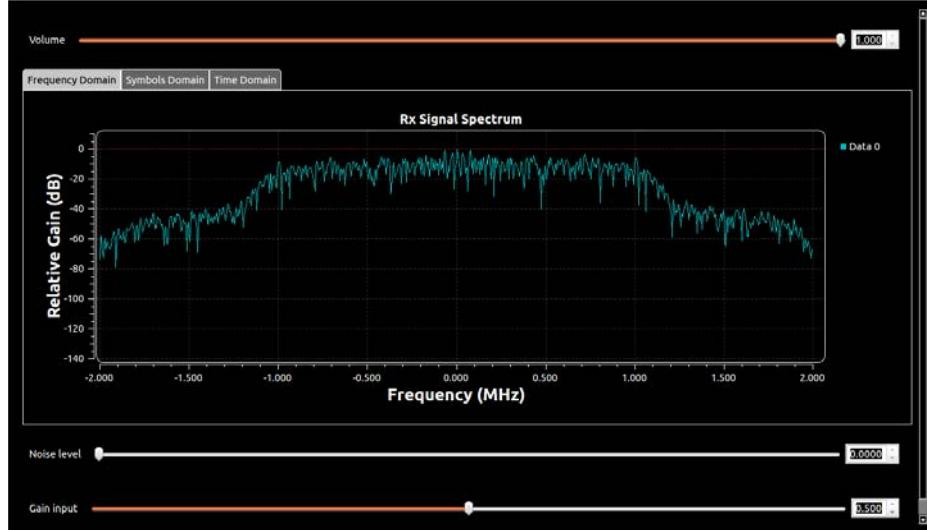
En la figura 37 se muestra la constelación que arroja la demodulación de BPSK, como se puede ver la constelación recibida no se define en un solo punto debido a las diferentes variables que perturban la señal, los puntos se encuentran aproximadamente separados 180°.

Figura 37 Constelación Demodulación BPSK



En la figura 38 se puede apreciar el espectro arrojado en la modulación BPSK, se observa que la gráfica del espectro en frecuencia no está bien definido debido a las perturbaciones presentadas en el canal, además se puede ver que la ganancia es mucho menor que la transmitida, esto nos demuestra que entre menor sea la ganancia mayor será el ruido.

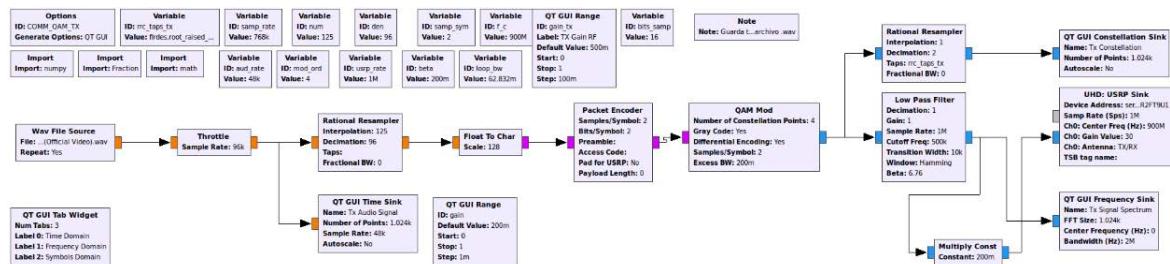
Figura 38 Espectro Demodulación BPSK



6.2 MODULACION 4QAM

La modulación 4QAM genera 4 puntos en su constelación, en la figura 39 se muestra el diagrama de bloques del transmisor.

Figura 39 Diagrama de Bloques Modulación 4QAM



Para poder entender el diagrama mostrado en la figura 39 explicaremos cada uno de sus componentes en cuanto a variables utilizadas y los módulos que representan cada uno de ellos.

Variables y librerías:

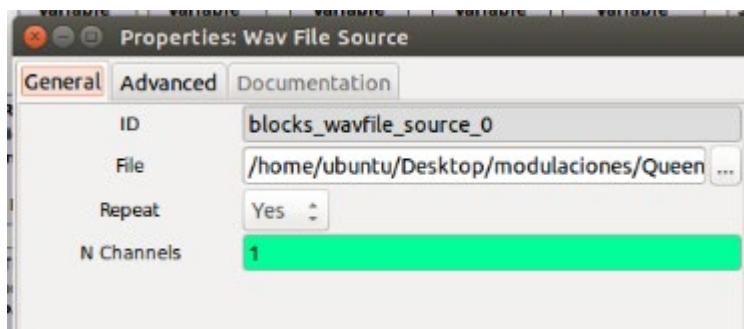
- rrc_taps_tx: Es un filtro digital que sirva para eliminar el ruido blanco.
- Samp_rate: Es la frecuencia de muestreo que requiere el archivo; int(aud_rate*bits_samp*samp_sym/math.log(mod_ord,2))
- num: Es una variable que por medio de la librería Fraction obtiene el valor de interpolación necesario para el ejercicio; int (Fraction (usrp_rate, samp_rate). numerator)
- den: Es una herramienta para obtener el valor de diezmado necesario para el ejercicio; int (Fraction (usrp_rate, samp_rate). denominator)
- numpy: librería utilizada para filtros digitales.
- Math: librería para realizar operaciones matemáticas.
- Aud_rate: Es la frecuencia para la tarjeta de audio del computador, en este caso se utiliza 48Khz.
- mod_ord: el orden de la modulación, en este caso es 4.
- Ursp_rate: Es el ancho de banda que se necesita para enviar el archivo, esto se debe a que la USRP tiene una frecuencia de muestreo 128Mhz, por lo tanto, debe ser adecuado para poder realizar el procesamiento de los datos en conjunto con Gnu Radio, el dato que se requiere para esta variable debe ser mayor o casi igual al samp_rate y además deben ser números enteros.
- Beta: coeficiente para el ancho de banda, no debe ser mayor a 1
- loop_bw: se refiere al punto de 3dB
- Samp_sym: Es el número de muestras por símbolo que requiere la modulación, se aconseja que no debe exceder 4 muestras por símbolo, debido a que se introduce demasiado ruido.
- f_c: es la frecuencia utilizada para la modulación en este caso se trabajó con 900Mhz, ya que la tarjeta secundaria es una FX900.

- bits_samp: es el número de bits por muestra
- gain: Es la ganancia de la tarjeta secundaria para la transmisión de los datos.

A continuación, se explican los módulos que hacen parte de la modulación 4QAM:

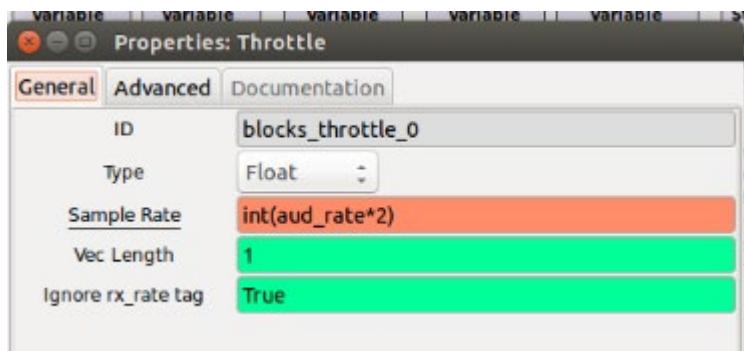
6.2.1 Wav File Source: Es el encargado de cargar el archivo de audio, para este caso se utilizó una canción de Queen. En la figura 40 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 40 Parámetros Wave File Source



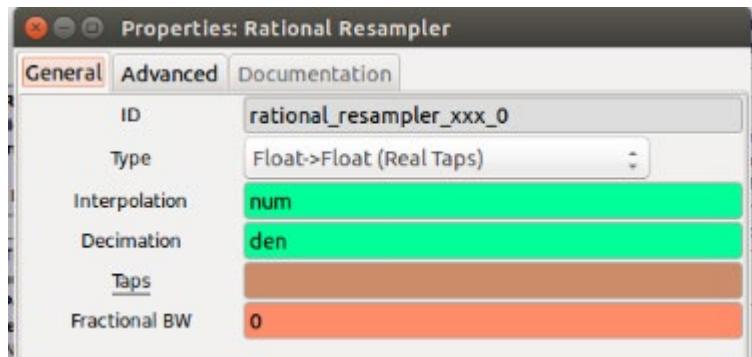
6.2.2 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida. En la figura 41 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 41 Parámetros Throlttle



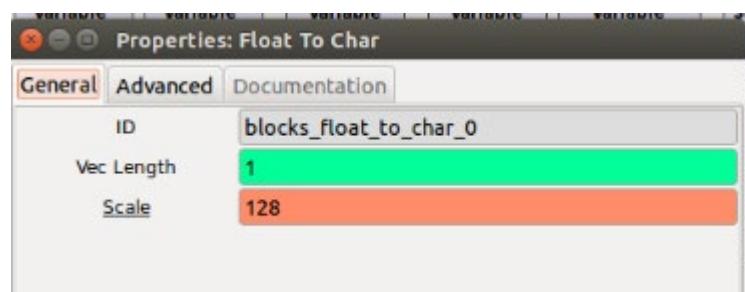
6.2.3 Rational Resampler: muestreador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia de muestreo del archivo de audio y la tasa de muestreo que necesita el upconverter del ursp. Upconverter necesita recibir múltiplos de 128 muestras por segundo (MPS). En la figura 42 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 42 Parámetros Rational Resampler



6.2.4 Float To Char: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles. Según el buscador Wikipedia la definición es “Cuantificación digital: El proceso de cuantificación digital es posterior a la etapa de muestreo en la que se toman valores de amplitud de una determinada señal analógica. El objetivo de este proceso es cuantificar con bits éstos valores, mediante la asignación de niveles. En esta etapa se le asigna un valor a la muestra, pero no es digital. En este punto se decide si el valor de la muestra está, por aproximación, dentro del margen de niveles previamente fijados y se le asigna un valor preestablecido según el código utilizado en la codificación”¹⁸ En la figura 43 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

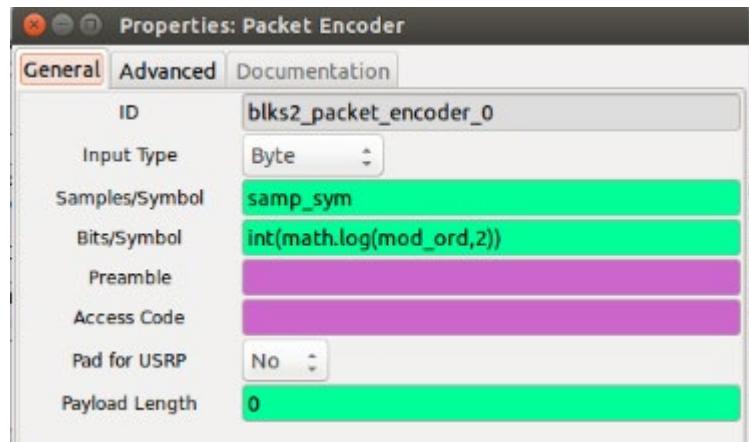
Figura 43 Parámetros Float To Char



¹⁸ WIKIPEDIA. Cuantificación digital [en línea] es.wikipedia.org [Consultado 30 de Junio de 2018] Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_digital

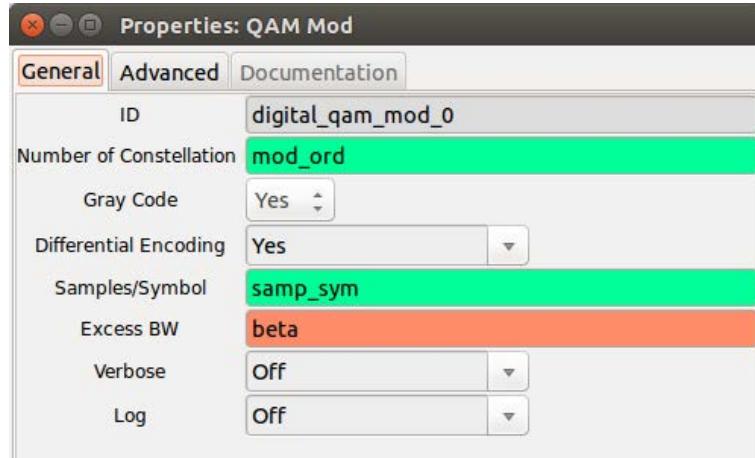
6.2.5 Packet Encoder: codificador de paquetes. Se encarga de fragmentar en cada dato tipo char a la salida un número de bits indicado por la variable bits/sym de cada byte que ingresa. La variable samp/sym se encarga de entregar ese número de muestras por símbolo de entrada. En la figura 44 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 44 Parámetros Packet Encoder



6.2.6 QAM Mod: Es el encargado de la modulación en QAM; Number of Constellation: es el grado de la constelación en esta ocasión es 4 por ser modulación 4QAM; Samples/Symbol: Numero de muestras por símbolo generalmente se utilizan dos muestras; Excess BW: Es la beta del filtro. En la figura 45 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 45 Parámetros QAM Mod



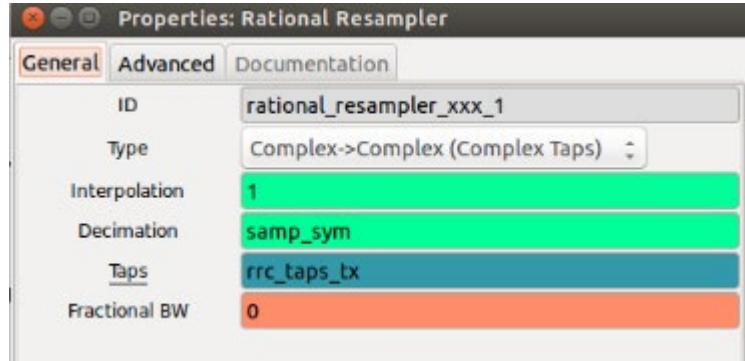
6.2.7 Low Pass Filter: Es un filtro pasa bajo, se decide filtrar las muestras antes de enviarlas a la USRP. En la figura 46 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 46 Parámetros Low Pass Filter



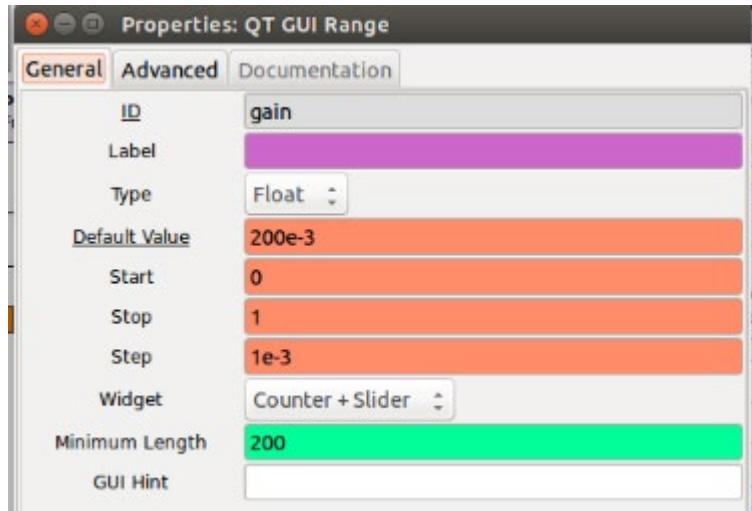
6.2.8 Rational Resampler: se encarga de enviar 1 símbolo por muestra para observar en la ventana de constelación. En la figura 47 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 47 Parámetros Rational Resampler



6.2.9 Multiply Const: Es la ganancia que regula a la tarjeta secundaria, para la transmisión de los datos, este módulo fue vital para poder realizar los laboratorios, en gran parte del tiempo se realizaron pruebas sin este módulo y la respuesta fue nula, debido a que estaba saturando su ganancia y por lo tanto solo obteníamos ruido en la recepción. En la figura 48 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo, la imagen mostrada es la variable que se crea para modificar la ganancia para este módulo.

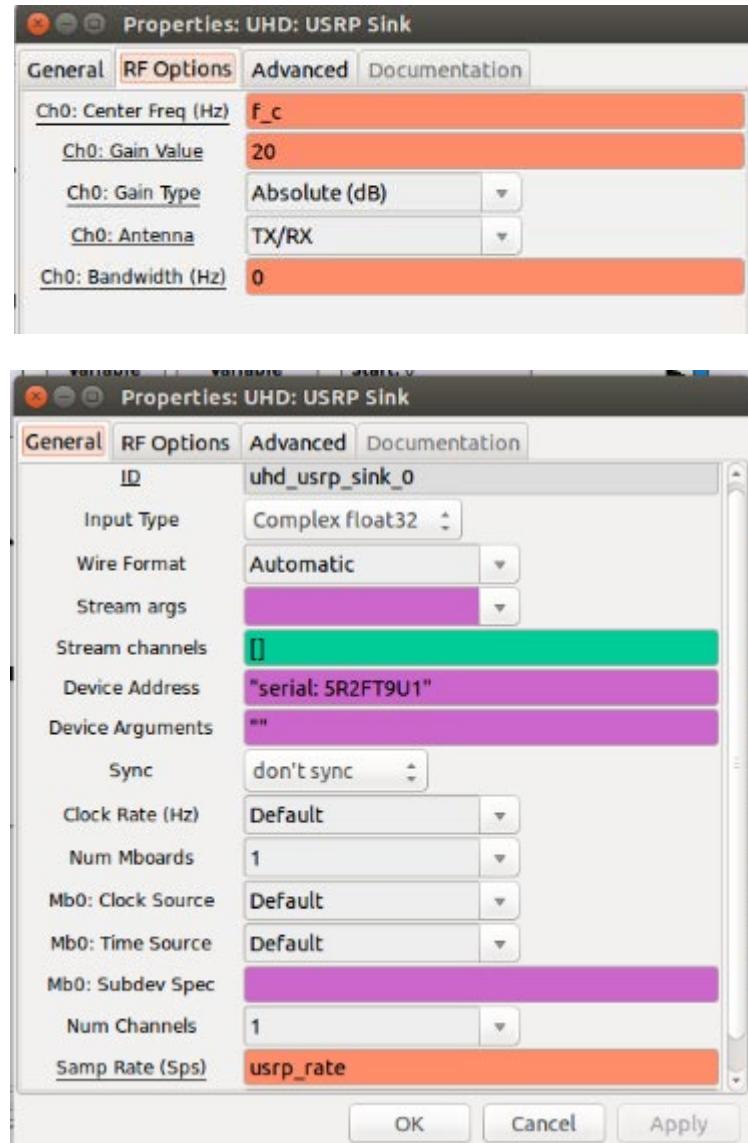
Figura 48 Parámetros QT Gui Range



6.2.10 UHD URSP Sink: Es el encargado recibir los parámetros para acondicionar las señales de la tarjeta madre. Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda

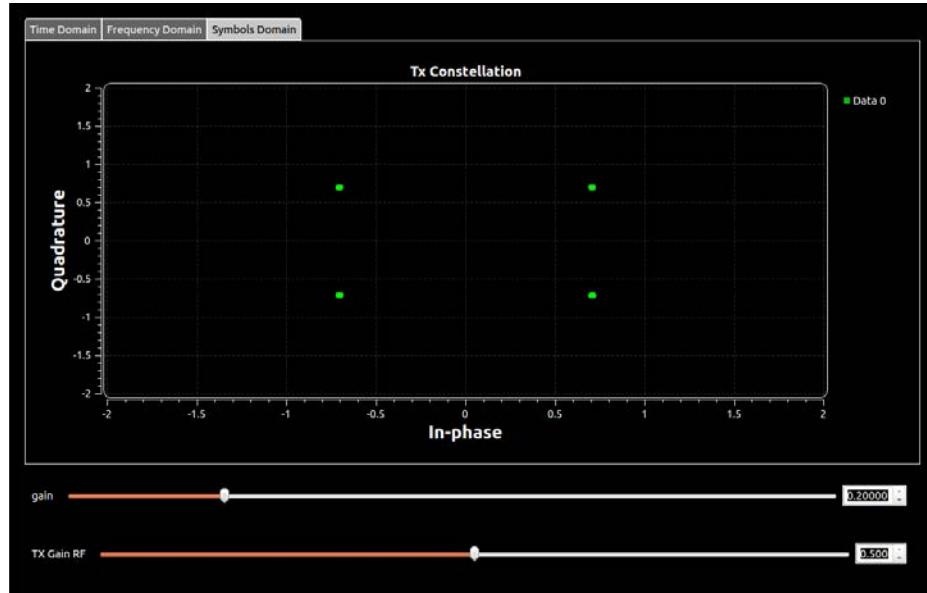
base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En figura 49 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 49 Parámetros UHD: USRP Sink



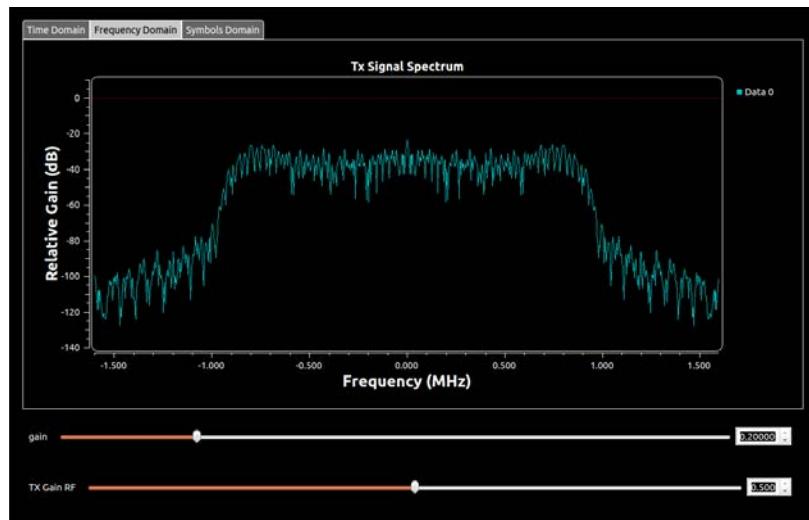
En la figura 50 muestra la constelación 4QAM, como se puede observar los puntos de constelación están completamente definidos. Ángulos (45° , -45° y 135° , -135°).

Figura 50 Constelación modulación 4QAM



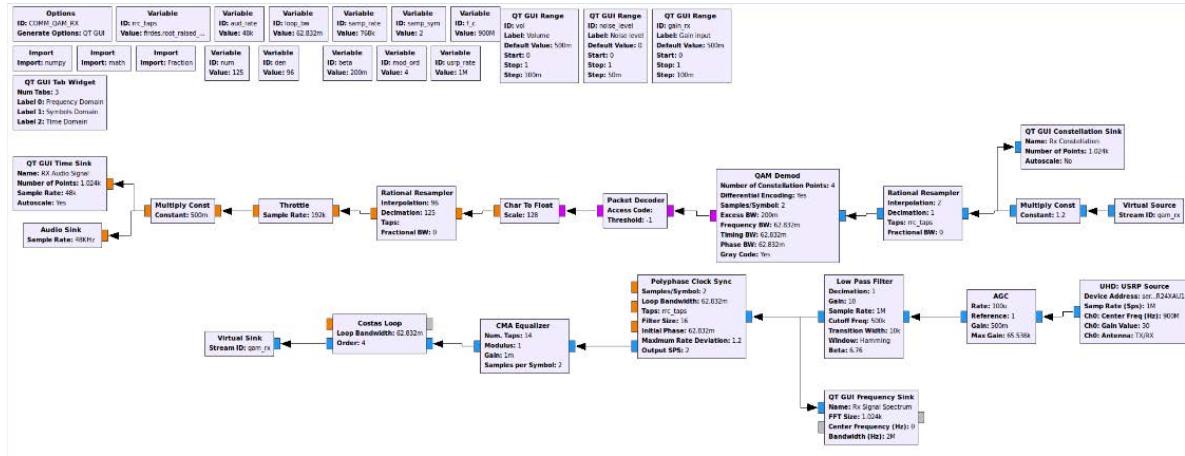
En la figura 51 muestra la gráfica que corresponde al espectro generado por la modulación 4QAM, en ella se observa la ganancia en decibeles y la frecuencia transmisión

Figura 51 Espectro modulación 4QAM



6.2.11 Demodulación 4QAM En este apartado mostraremos el esquema que corresponde a la demodulación 4QAM y se explicaran sus módulos.

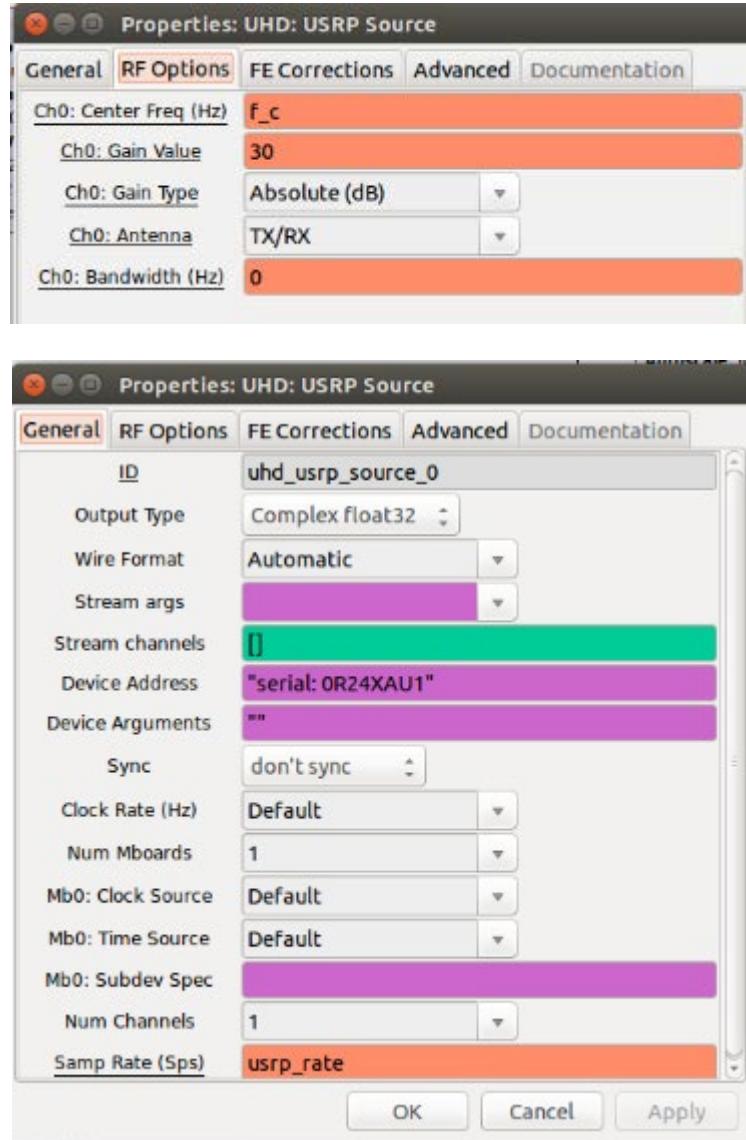
Figura 52 Diagrama de Bloques Receptor 4QAM



Como se observa en la figura 52 el esquema del demodulador es muy similar al implementado en el transmisor, la variante es que los módulos cambian, es decir se invierten en su posición, por otro lado, para el bloque demodulador se adicionan unos cuantos bloques para poder obtener los resultados satisfactoriamente.

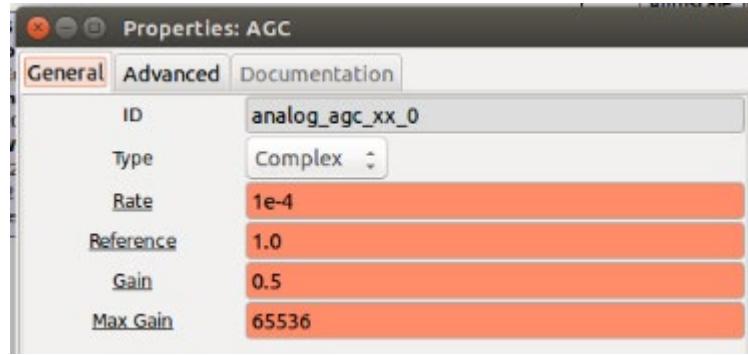
6.2.12 UHD: URSP Source: se trata del módulo inicial que es el encargado de capturar la información para ser procesada por el software Gnu Radio. Los parámetros más relevantes son: Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En la figura 53 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 53 Parámetros UHD: USRP Source



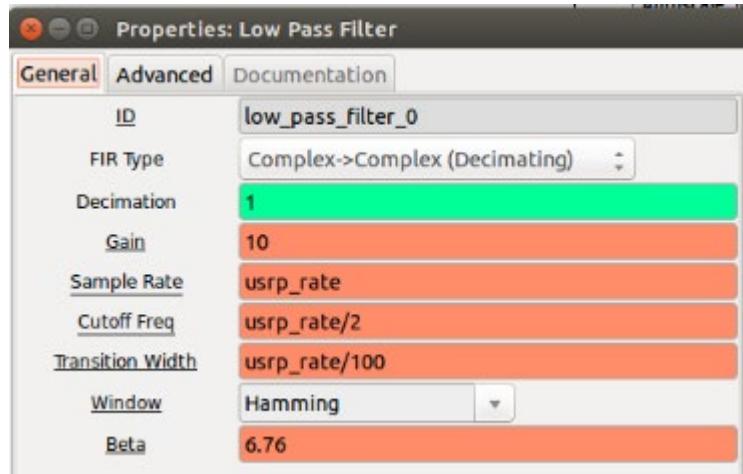
6.2.13 AGC: Control Automático de Ganancia. Es la encargada de variar la ganancia con respecto al nivel de señal que se recibe. En la figura 54 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 54 Parámetros ACG



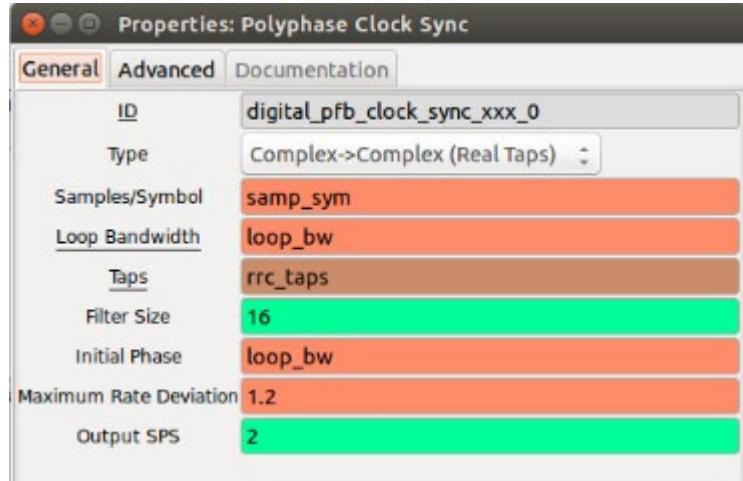
6.3.14 Low Pass Filter: la señal debe de ser acotada en el dominio de la frecuencia, así como evitar que tome otras señales en el espectro que no estamos esperando. En la figura 55 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 55 Parámetros Low Pass Filter



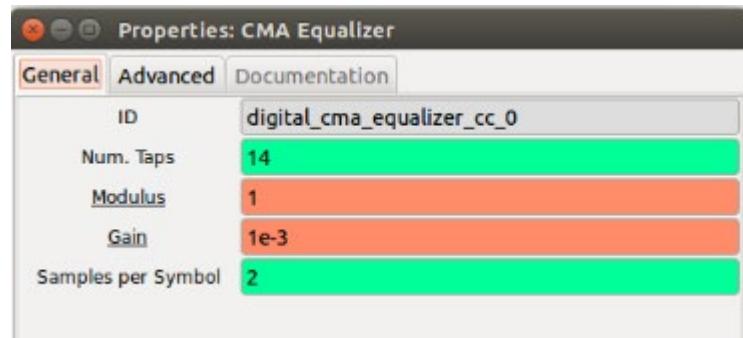
6.2.15 Polyphase Clock Sync: Arreglo de filtros polifase para sincronización de símbolos entre transmisor y receptor. Estos filtros son del tipo raíz coseno alzado, por ende, acá ya se realiza la conformación de símbolos antes de la detección en el demodulador. Acá se decima por 2 con el fin de ajustar mejor la sincronización. En la figura 56 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 56 Parámetros Polyphase Clock Sync



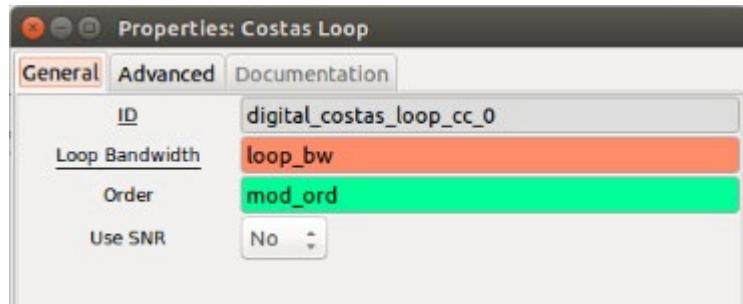
6.2.16 CMA Equalizer: ecualizador de módulo constante. Este es necesario para igualar la amplitud de todos los símbolos. Este tipo de ecualizador es funcional solo en modulaciones de fase. En la figura 57 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 57 Parámetros CMA Equalizer



6.2.17 Costas Loop: Se encarga de mantener la frecuencia de la portadora. En la figura 58 se muestra la configuración para este módulo.

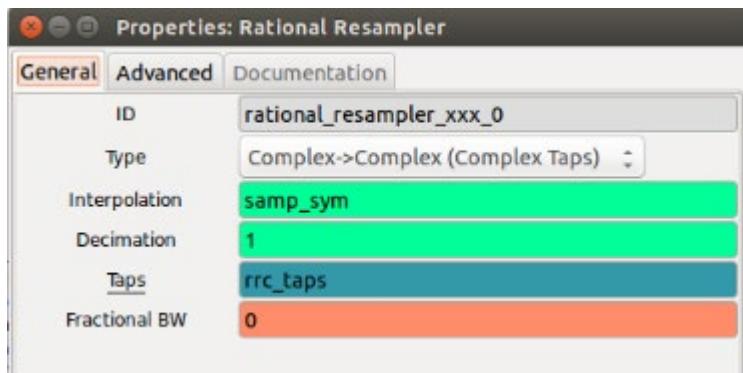
Figura 58 Parámetros Costas Loop



6.2.18 Multiply Const: Esta ganancia se utiliza para ampliar la señal que recibe del costas Loop.

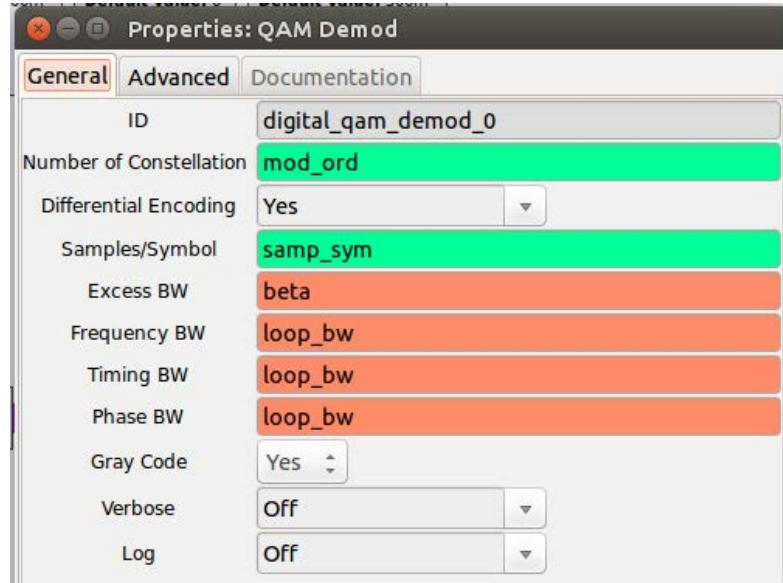
6.2.19 Rational Resampler: este se justifica debido a que la señal se diezma por 2 en el filtro polifase, entonces para recuperar adecuadamente los símbolos en el demodulador PSK, se necesita duplicar los símbolos de nuevo, además se introduce un filtro rrc_taps. En la figura 59 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 59 Parámetros Rational Resampler



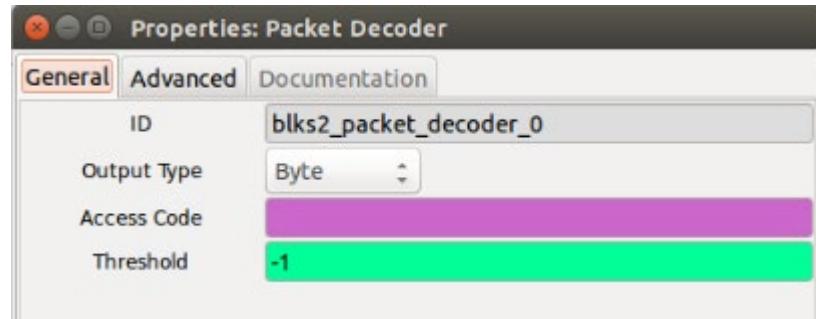
6.2.20 QAM Demod: Demodulador QAM Es el encargado de recuperar la información. En la figura 60 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 60 Parámetros QAM Demod



6.2.21 Packet Decoder: Es el decodificador de paquetes. En la figura 61 se muestra la configuración de este módulo

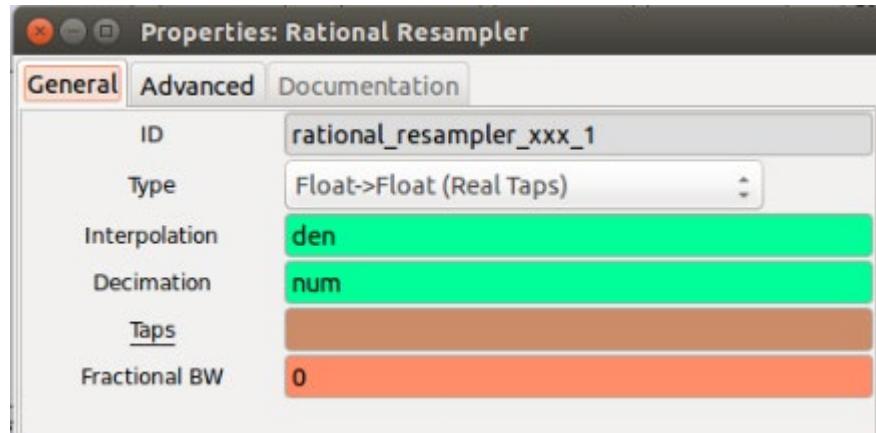
Figura 61 Parámetros Packet Encoder



6.3.22 Char To Float: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles.

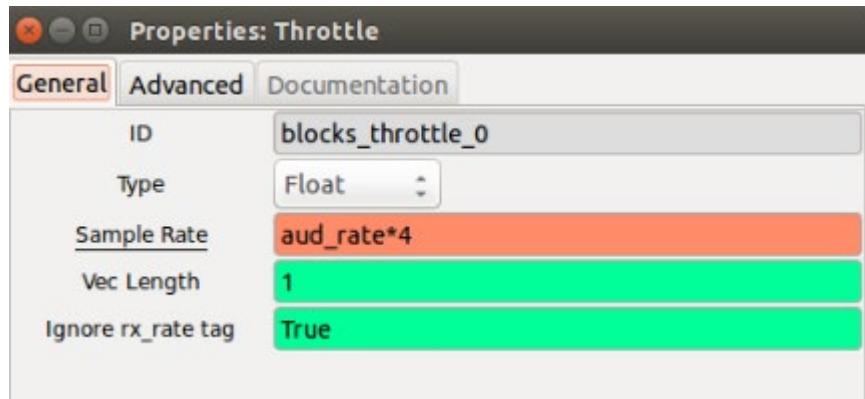
6.2.23 Rational Resampler: muestreador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia del upconvert del USRP a la frecuencia de muestreo del archivo de audio. En la figura 62 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 62 Parámetros Rational Resampler



6.2.24 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida, el muestreo debe ser el doble del modulador. En la figura 63 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

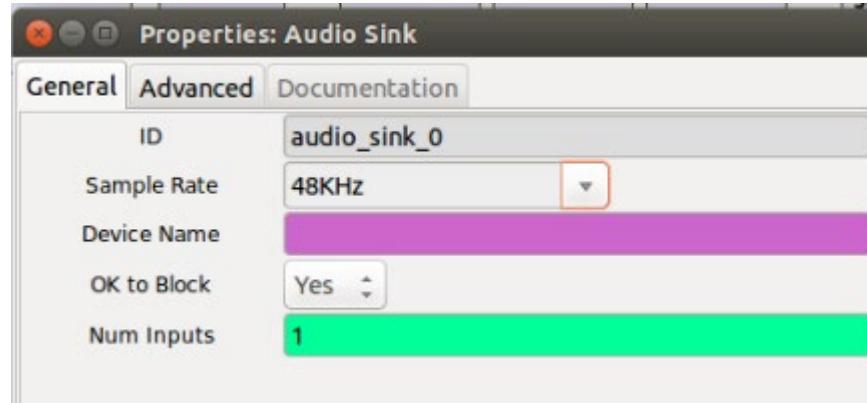
Figura 63 Parámetros Throttle



6.2.25 Multiply Const: Es la ganancia para el volumen de la canción a reproducir.

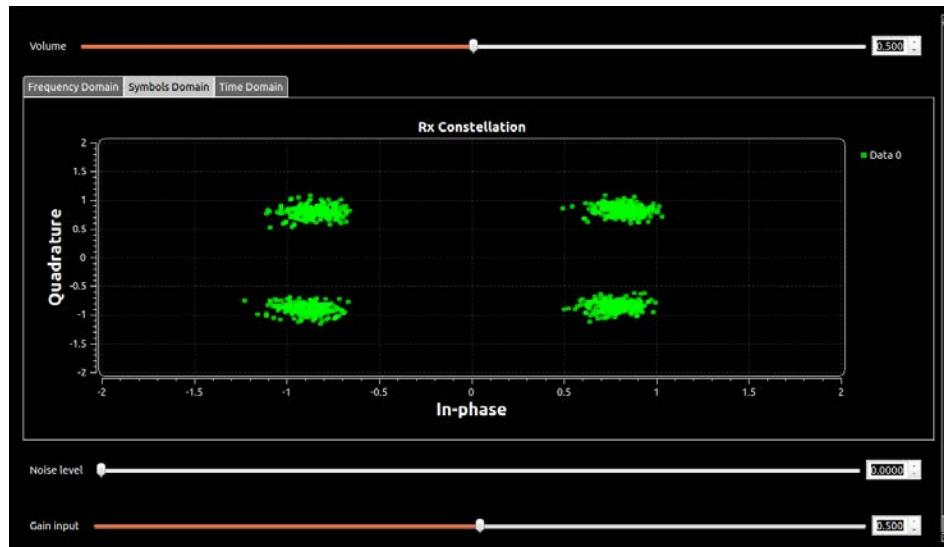
6.2.26 Audio Sink: Es el encargado de reproducir el archivo en la frecuencia de 48Khz. En la figura 64 se muestra la configuración de parámetros para este módulo.

Figura 64 Audio Sink



En la figura 65 se muestra la constelación que arroja la demodulación de 4QAM, cada punto representa un estado de señal o fasor en magnitud y fase. Este estado de señal generalmente difiere del punto que originalmente fue transmitido, como se puede ver la constelación recibida no está bien definida debido a las diferentes variables que perturban la señal como son el ruido blanco, distorsión de banda dentro y fuera, sus ángulos se aproximan a los 45° , -45° y 135° , -135° .

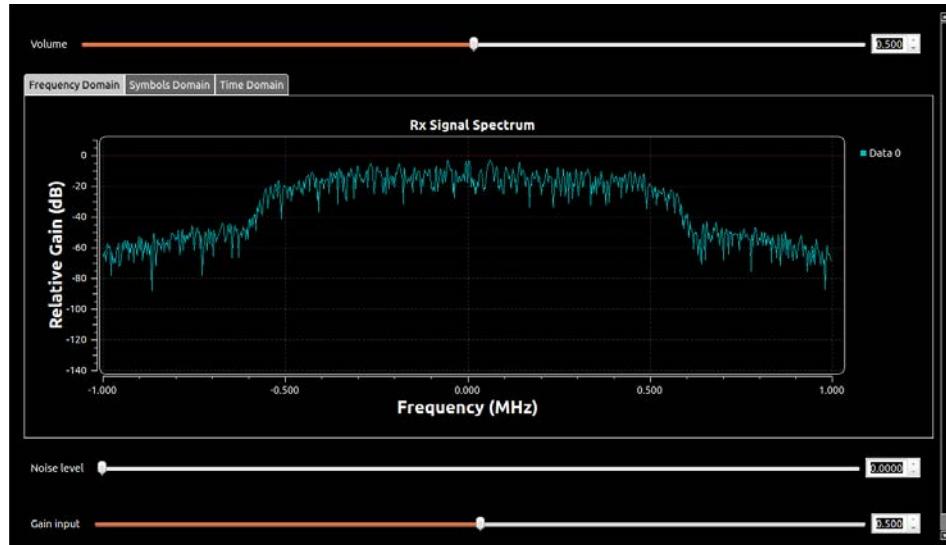
Figura 65 Constelación Demodulación 4QAM



En la figura 66 muestra la gráfica que corresponde al espectro generado por la demodulación 4QAM, en ella se observa la ganancia en decibeles y la frecuencia

de transmisión, su ganancia tiende a reducirse debido al ruido que se pueda presentar en el canal.

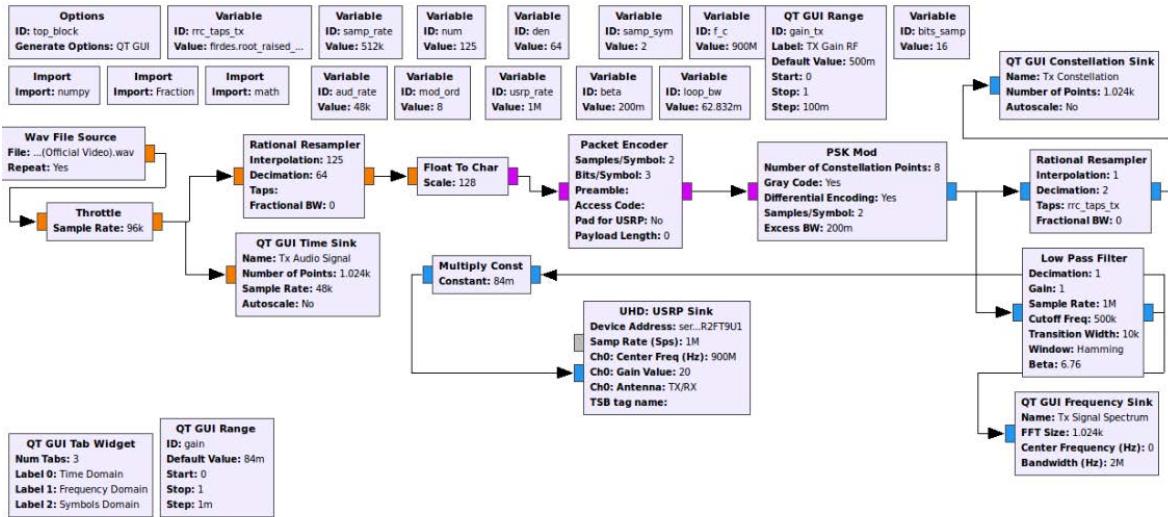
Figura 66 Espectro Demodulación 4QAM



6.3 MODULACIÓN 8PSK

En esta modulación se generan 8 puntos en su constelación, el diagrama general del transmisor para modulaciones 8PSK se muestra en la figura 67.

Figura 67 Diagrama de Bloques Transmisor 8psk



Para poder entender el diagrama mostrado en la figura 67 explicaremos cada uno de sus componentes en cuanto a variables utilizadas y los módulos que representan cada uno de ellos.

Variables y librerías:

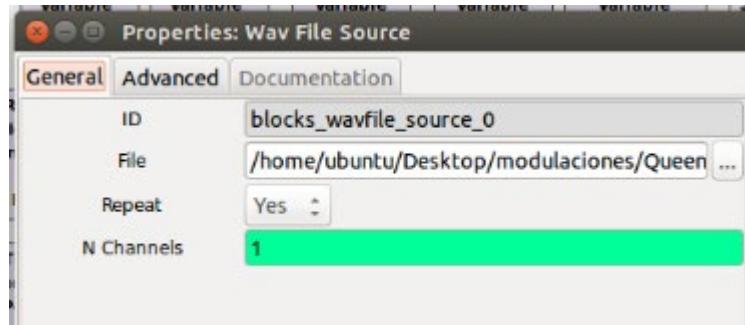
- rrc_taps_tx: Es un filtro digital que sirva para eliminar el ruido blanco.
- Samp_rate: Es la frecuencia de muestreo que requiere el archivo; $\text{int}(\text{aud_rate} * \text{bits_samp} * \text{sam_sym} / \text{math.log(mod_ord, 2)})$
- num: Es una variable que por medio de la librería Fraction obtiene el valor de interpolación necesario para el ejercicio; $\text{int}(\text{Fraction(usrp_rate, samp_rate).numerator})$
- den: Es una herramienta para obtener el valor de diezmado necesario para el ejercicio; $\text{int}(\text{Fraction(usrp_rate, samp_rate).denominator})$
- numpy: librería utilizada para filtros digitales.
- Math: librería para realizar operaciones matemáticas.
- Aud_rate: Es la frecuencia para la tarjeta de audio del computador, en este caso se utiliza 48Khz.

- mod_ord: el orden de la modulación, en este caso es 2.
- Ursp_rate: Es el ancho de banda que se necesita para enviar el archivo, esto se debe a que la USRP tiene una frecuencia de muestreo 128Mhz, por lo tanto, debe ser adecuado para poder realizar el procesamiento de los datos en conjunto con Gnu Radio, el dato que se requiere para esta variable debe ser mayor o casi igual al samp_rate y además deben ser números enteros; int(128e6/80).
- Beta: coeficiente para el ancho de banda, no debe ser mayor a 1
- loop_bw: se refiere al punto de 3dB
- Samp_sym: Es el número de muestras por símbolo que requiere la modulación, se aconseja que no debe exceder 4 muestras por símbolo, debido a que se introduce demasiado ruido.
- f_c: es la frecuencia utilizada para la modulación en este caso se trabajó con 900Mhz, ya que la tarjeta secundaria es una FX900.
- bits_samp: es el número de bits por muestra
- gain: Es la ganancia de la tarjeta secundaria para la transmisión de los datos.

A continuación, se explican los módulos que hacen parte de la modulación 8PSK:

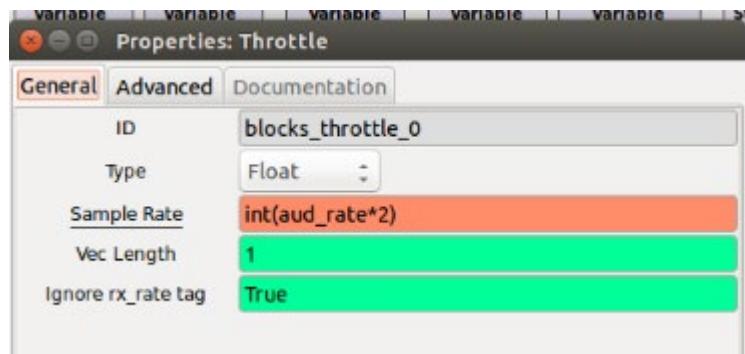
6.3.1 Wav File Source: Es el encargado de cargar el archivo de audio, para este caso se utilizó una canción de Queen. En la figura 68 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 68 Parámetros Wave File Source



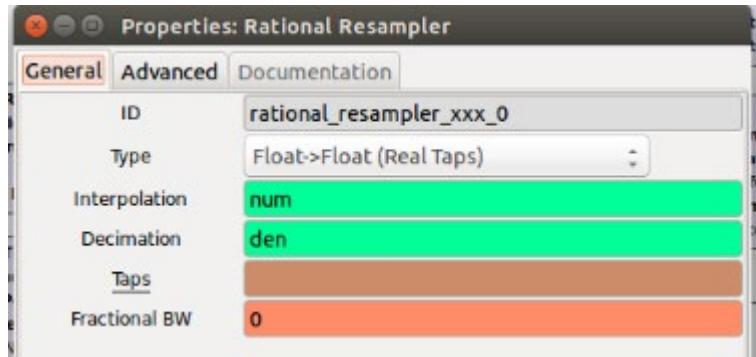
6.3.2 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida. En la figura 69 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 69 Parámetros Throttle



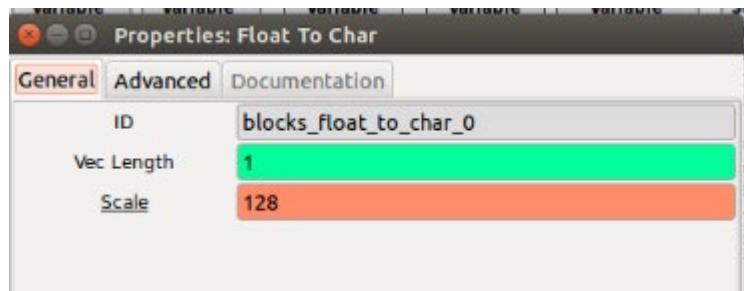
6.3.3 Rational Resampler: muestreador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia de muestreo del archivo de audio y la tasa de muestreo que necesita el upconverter del ursp. Upconverter necesita recibir múltiplos de 128 muestras por segundo (MPS). En la figura 70 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 70 Parámetros Rational Resampler



6.3.4 Float To Char: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles. Según el buscador Wikipedia la definición es “Cuantificación digital: El proceso de cuantificación digital es posterior a la etapa de muestreo en la que se toman valores de amplitud de una determinada señal analógica. El objetivo de este proceso es cuantificar con bits éstos valores, mediante la asignación de niveles. En esta etapa se le asigna un valor a la muestra, pero no es digital. En este punto se decide si el valor de la muestra está, por aproximación, dentro del margen de niveles previamente fijados y se le asigna un valor preestablecido según el código utilizado en la codificación”¹⁹ En la figura 71 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

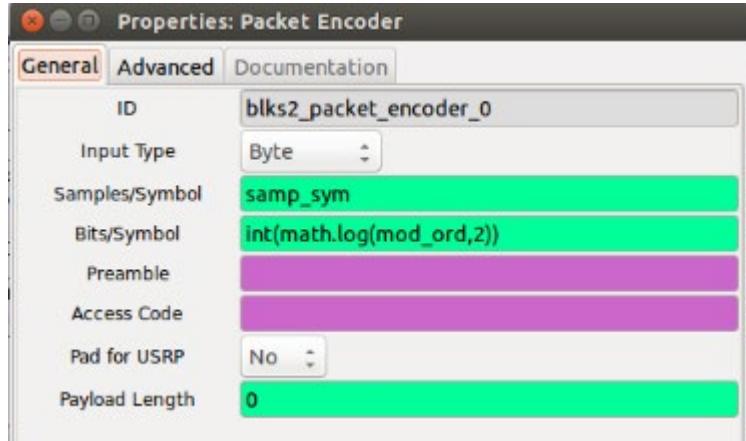
Figura 71 Parámetros Float To Char



6.3.5 Packet Encoder: codificador de paquetes. Se encarga de fragmentar en cada dato tipo char a la salida un número de bits indicado por la variable bits/sym de cada byte que ingresa. La variable samp/sym se encarga de entregar ese número de muestras por símbolo de entrada. En la figura 72 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

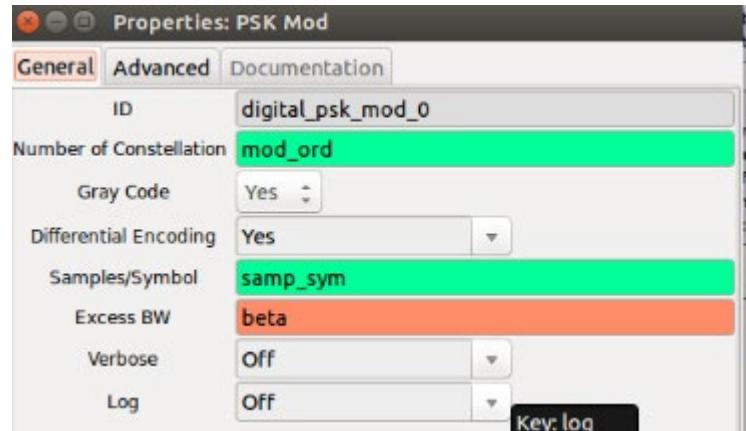
¹⁹ WIKIPEDIA. Cuantificación digital [en línea] es.wikipedia [Consultado 30 de Junio de 2018]
Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_digital

Figura 72 Parámetros Packet Encoder



6.3.6 PSK Mod: Es el encargado de la modulación en PSK; Number of Constellation: es el grado de la constelación en esta ocasión es 8 por ser modulación 8PSK; Samples/Symbol: Numero de muestras por símbolo generalmente se utilizan dos muestras; Excess BW: Es la beta del filtro. En la figura 73 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 73 Parámetros PSK Mod



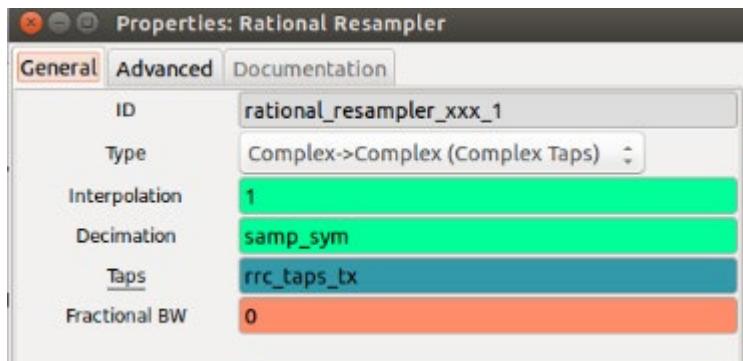
6.3.7 Low Pass Filter: Es un filtro pasa bajo, se decide filtrar las muestras antes de enviarlas a la USRP. En la figura 74 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 74 Parámetros Low Pass Filter



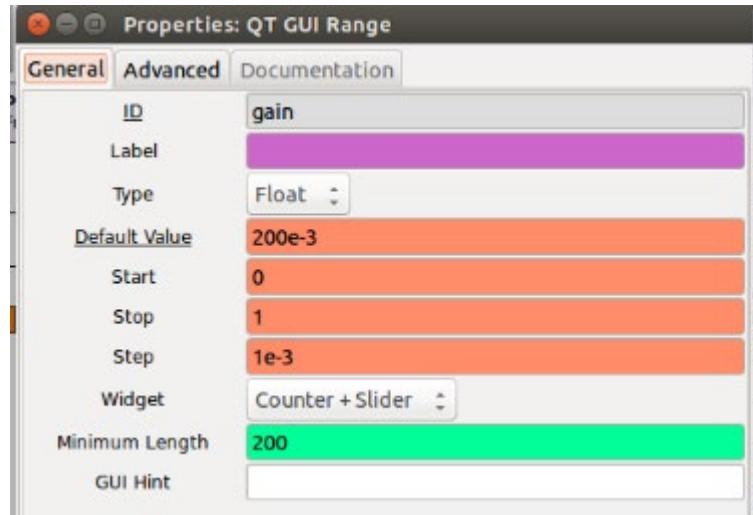
6.3.8 Rational Resampler: se encarga de enviar 1 símbolo por muestra para observar en la ventana de constelación. En la figura 75 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 75 Parámetros Rational Resampler



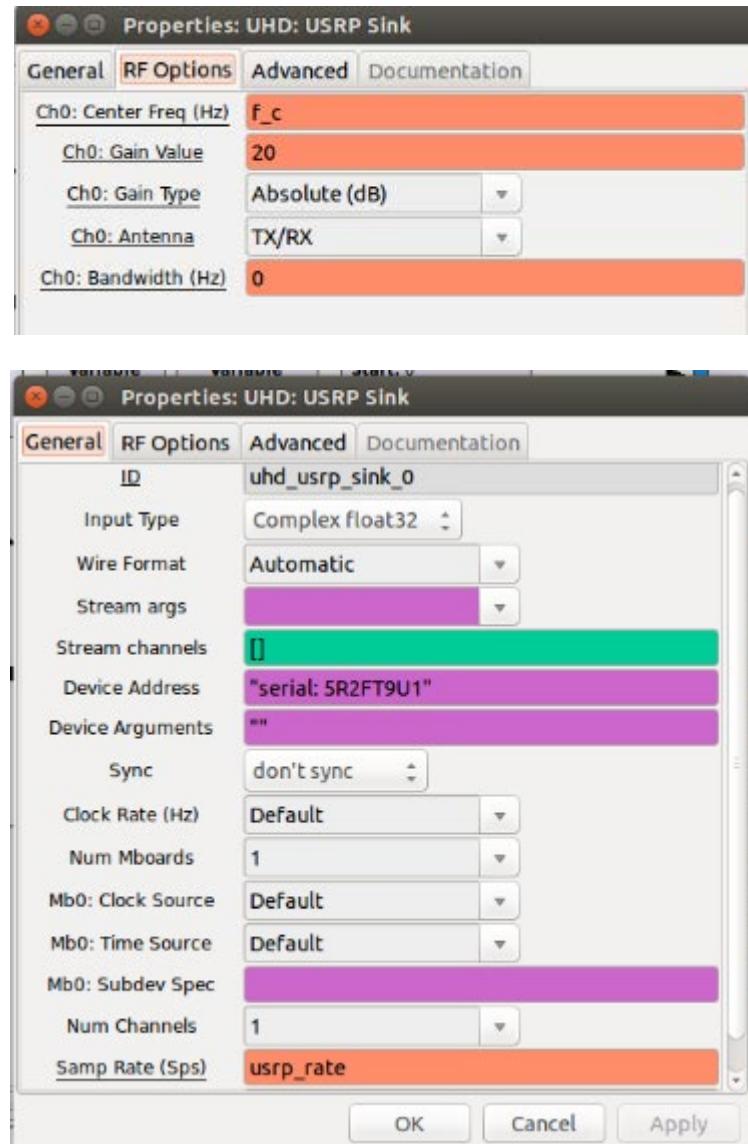
6.3.9 Multiply Const: Es la ganancia que regula a la tarjeta secundaria, para la transmisión de los datos, este módulo fue vital para poder realizar los laboratorios, en gran parte del tiempo se realizaron pruebas sin este módulo y la respuesta fue nula, debido a que estaba saturando su ganancia y por lo tanto solo obteníamos ruido en la recepción. En la figura 76 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo, la imagen mostrada es la variable que se crea para modificar la ganancia para este módulo.

Figura 76 Parámetros QT Gui Range



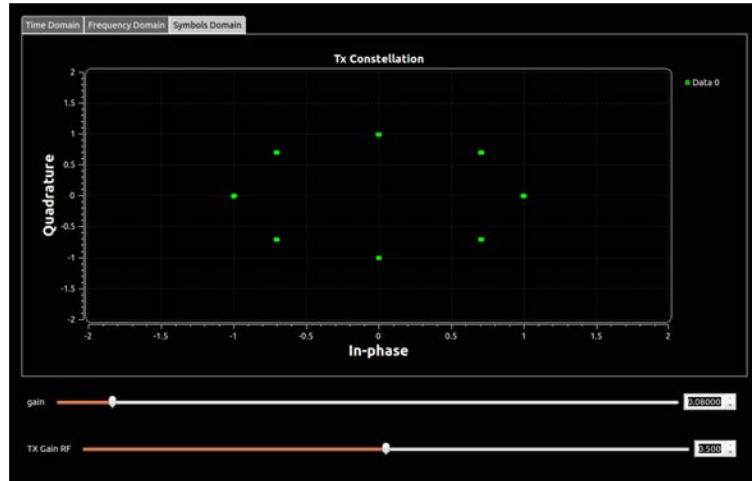
6.3.10 UHD URSP Sink: Es el encargado recibir los parámetros para acondicionar las señales de la tarjeta madre. Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En figura 77 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 77 Parámetros UHD: USRP Sink



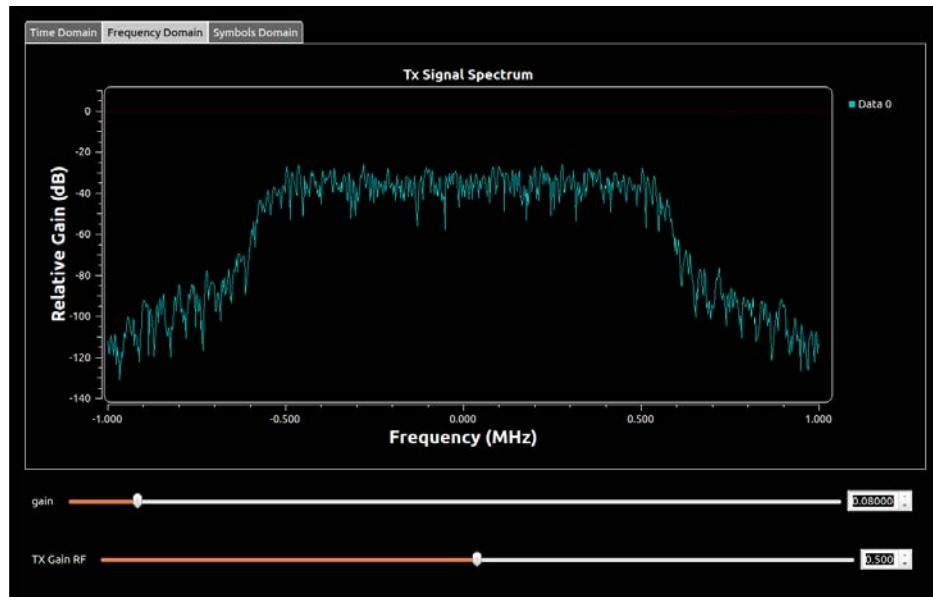
En la figura 78 muestra la constelación 8PSK, como se puede observar los puntos de constelación están completamente definidos, también esta separada angularmente con amplitud constante y su constelación forma una figura geométrica como una circunferencia esto se debe a que tiene un desplazamiento en fase, los ángulos son: (112.5°, -112.5°; 157.5°, -157.5°; 67.5°, -67.5°; 22.5°, -22.5°).

Figura 78 Constelación modulación 8PSK



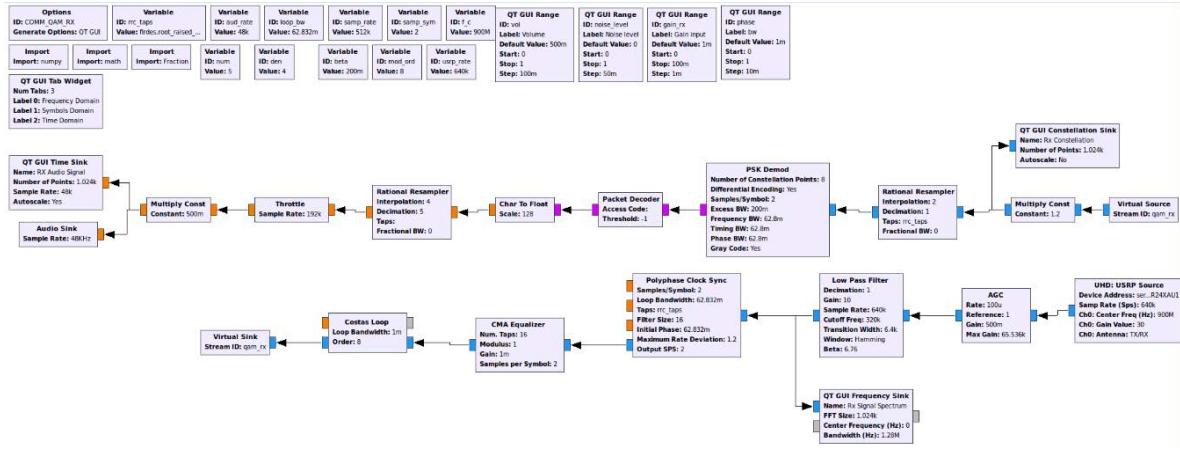
En la figura 79 muestra la gráfica que corresponde al espectro generado por la modulación 8PSK, en ella se observa la ganancia en decibeles y la frecuencia transmisión

Figura 79 Espectro modulación 8PSK



6.3.11 Demodulación 8PSK En este apartado mostraremos el esquema que corresponde a la demodulación 8PSK y se explicaran sus módulos.

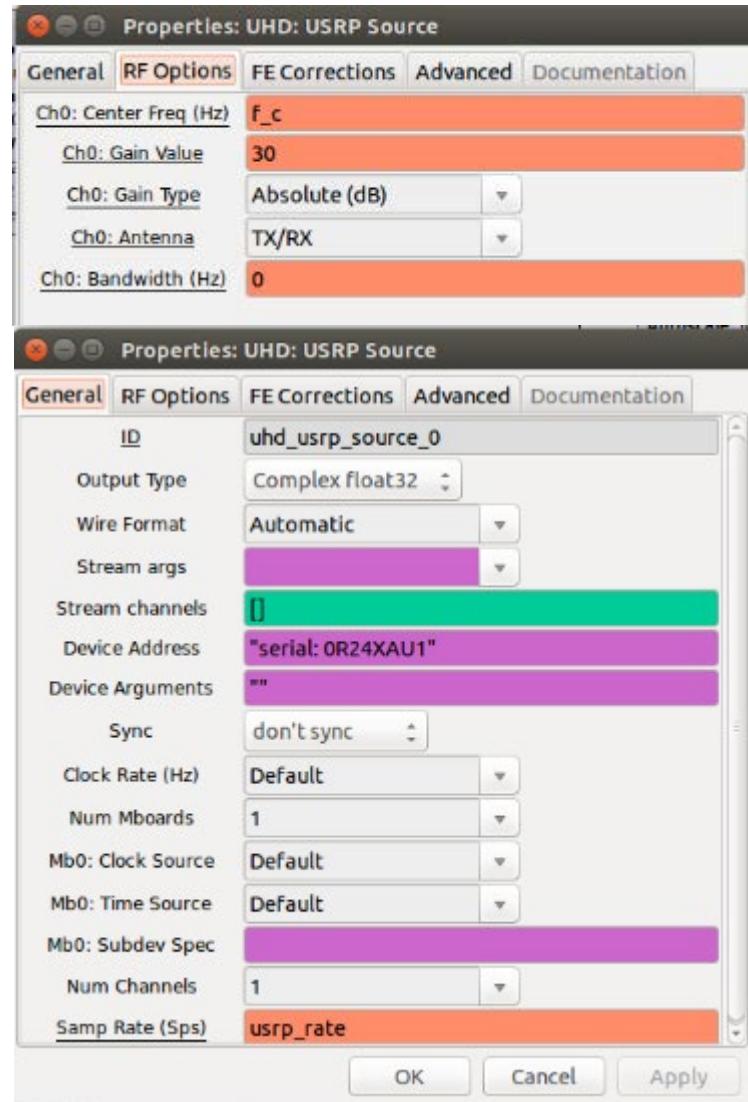
Figura 80 Diagrama de Bloques Receptor 8PSK



Como se observa en la figura 80 el esquema del demodulador es muy similar al implementado en el transmisor, la variante es que los módulos cambian, es decir se invierten en su posición, por otro lado, para el bloque demodulador se adicionan unos cuantos bloques para poder obtener los resultados satisfactoriamente.

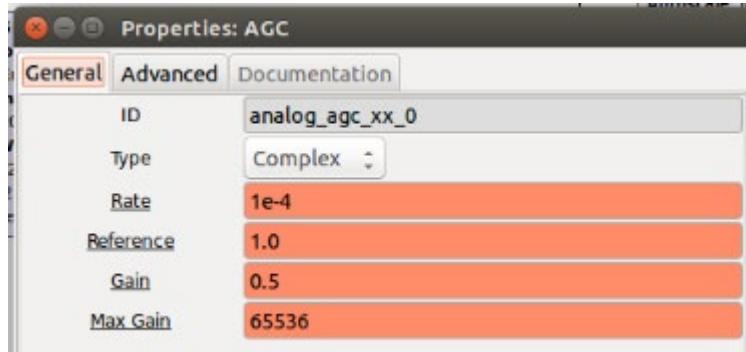
6.3.12 UHD: URSP Source: se trata del módulo inicial que es el encargado de capturar la información para ser procesada por el software Gnu Radio. Los parámetros más relevantes son: Device Address: es el numero serial de la tarjeta madre que corresponde a la USRP; Samp Rate: es el ancho de banda con que se están transmitiendo los datos; Ch0: Center Freq(Hz): es la frecuencia de banda base, en este caso se utiliza una frecuencia de 900Mhz. En la figura 81 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 81 Parámetros UHD: USRP Source



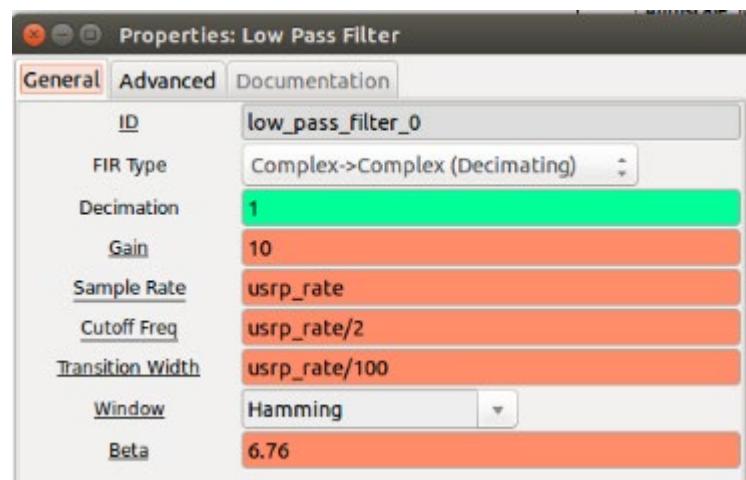
6.3.13 AGC: Control Automático de Ganancia. Es la encargada de variar la ganancia con respecto al nivel de señal que se recibe. En la figura 82 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 82 Parámetros ACG



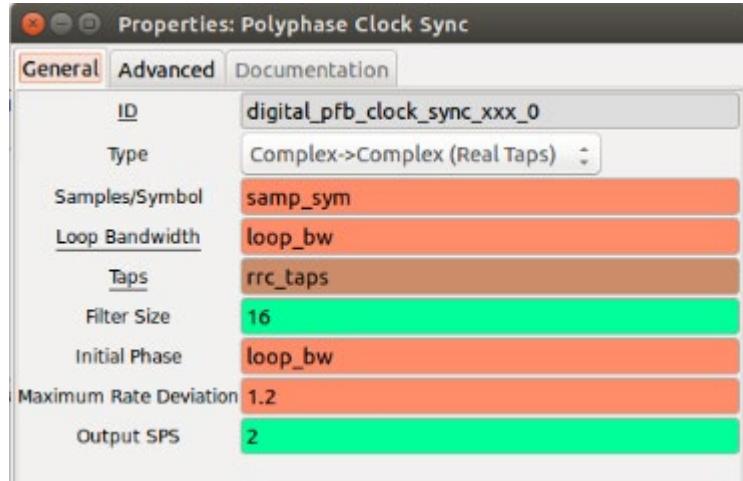
6.3.14 Low Pass Filter: la señal debe de ser acotada en el dominio de la frecuencia, así como evitar que tome otras señales en el espectro que no estamos esperando. En la figura 83 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 83 Parámetros Low Pass Filter



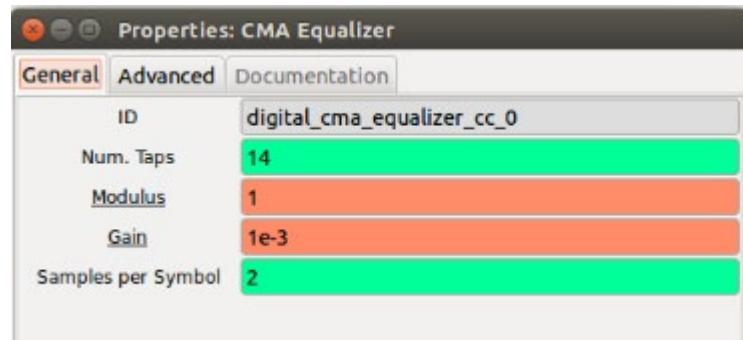
6.3.15 Polyphase Clock Sync: Arreglo de filtros polifase para sincronización de símbolos entre transmisor y receptor. Estos filtros son del tipo raíz coseno alzado, por ende, acá ya se realiza la conformación de símbolos antes de la detección en el demodulador. Acá se decima por 2 con el fin de ajustar mejor la sincronización. En la figura 84 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 84 Parámetros Polyphase Clock Sync



6.3.16 CMA Equalizer: ecualizador de módulo constante. Este es necesario para igualar la amplitud de todos los símbolos. Este tipo de ecualizador es funcional solo en modulaciones de fase. En la figura 85 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 85 Parámetros CMA Equalizer



6.3.17 Costas Loop: Se encarga de mantener la frecuencia de la portadora. En la figura 86 se muestra la configuración para este módulo.

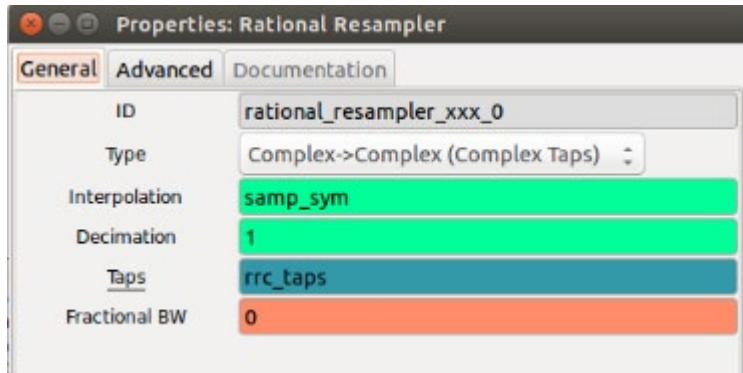
Figura 86 Parámetros Costas Loop



6.3.18 Multiply Const: Esta ganancia se utiliza para ampliar la señal que recibe del costas Loop.

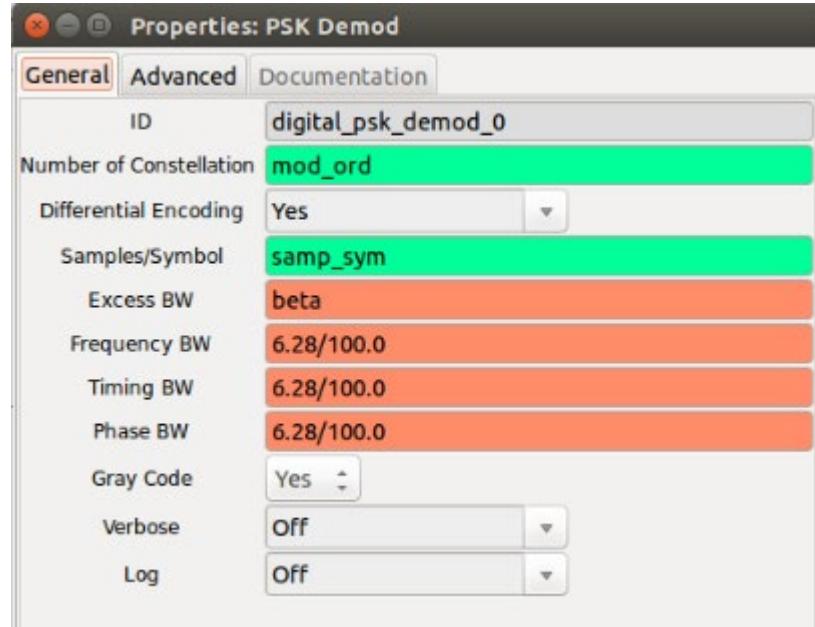
6.3.19 Rational Resampler: este se justifica debido a que la señal se diezma por 2 en el filtro polifase, entonces para recuperar adecuadamente los símbolos en el demodulador PSK, se necesita duplicar los símbolos de nuevo, además se introduce un filtro rrc_taps. En la figura 87 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 87 Parámetros Rational Resampler



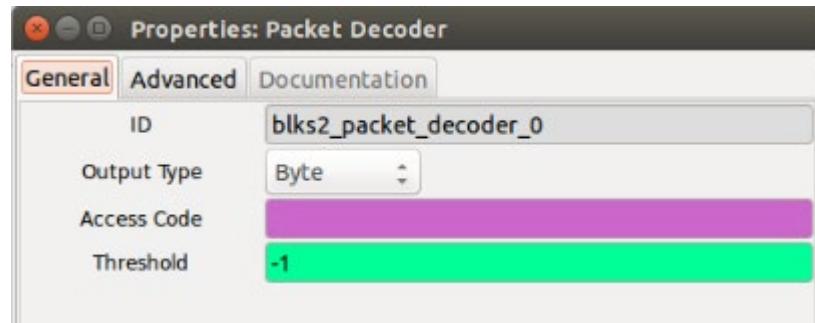
6.3.20 PSK Demod: Demodulador PSK Es el encargado de recuperar la información. En la figura 88 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 88 Parámetros PSK Demod



6.3.21 Packet Decoder: Es el decodificador de paquetes. En la figura 89 se muestra la configuración de este módulo

Figura 89 Parámetros Packet Encoder

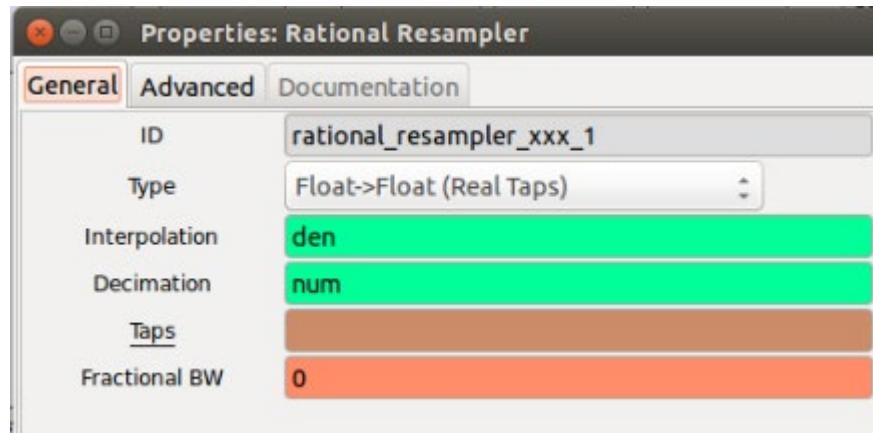


6.3.22 Char To Float: este conversor de tipo de datos funciona como cuantizador de 128 niveles.

6.3.23 Rational Resampler: muestrador racional. Es el encargado de hacer la conversión de la frecuencia del upconvert del USRP a la frecuencia de muestreo del

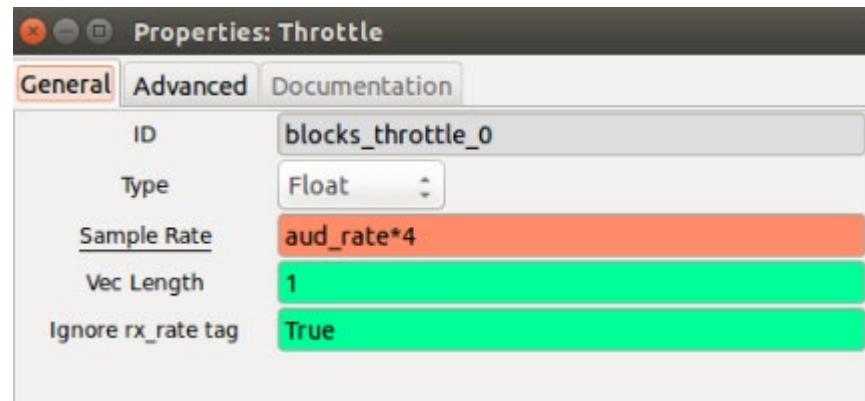
archivo de audio. En la figura 90 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 90 Parámetros Rational Resampler



6.3.24 Throttle: regulador de flujo de datos. Se encarga de mantener un flujo constante de los datos en la salida, el muestreo debe ser el doble del modulador. En la figura 91 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

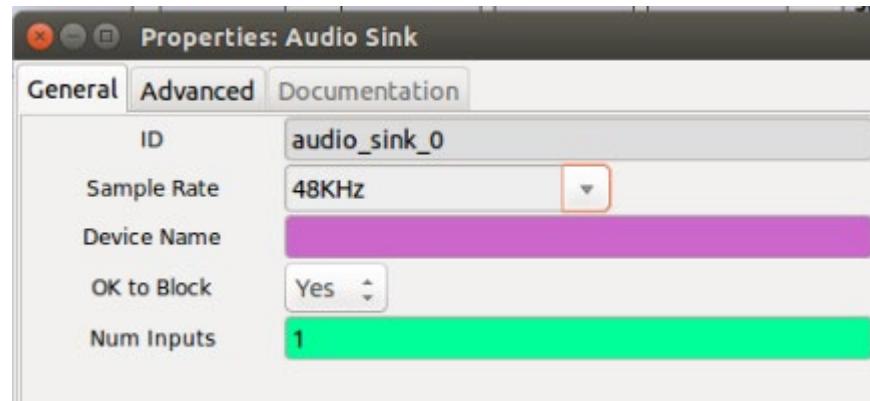
Figura 91 Parámetros Throttle



6.4.25 Multiply Const: Es la ganancia para el volumen de la canción a reproducir.

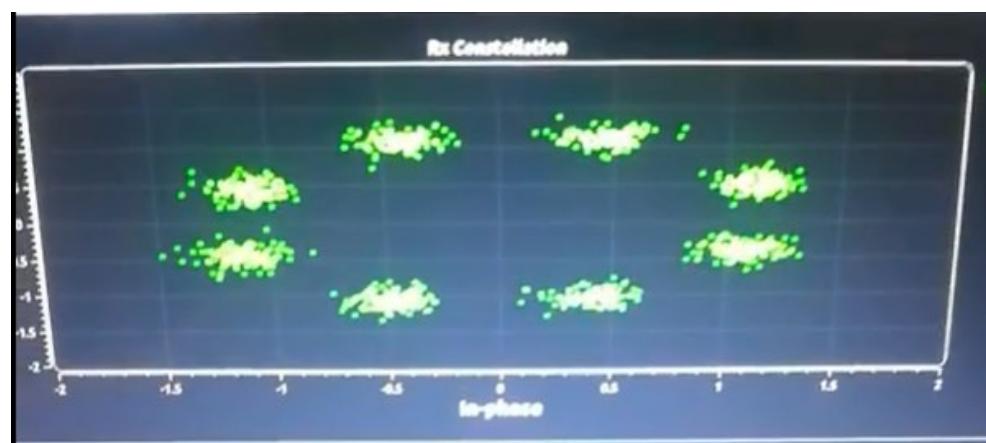
6.4.26 Audio Sink: Es el encargado de reproducir el archivo en la frecuencia de 48Khz. En la figura 92 se muestra la configuración de parámetros para este módulo.

Figura 92 Audio Sink



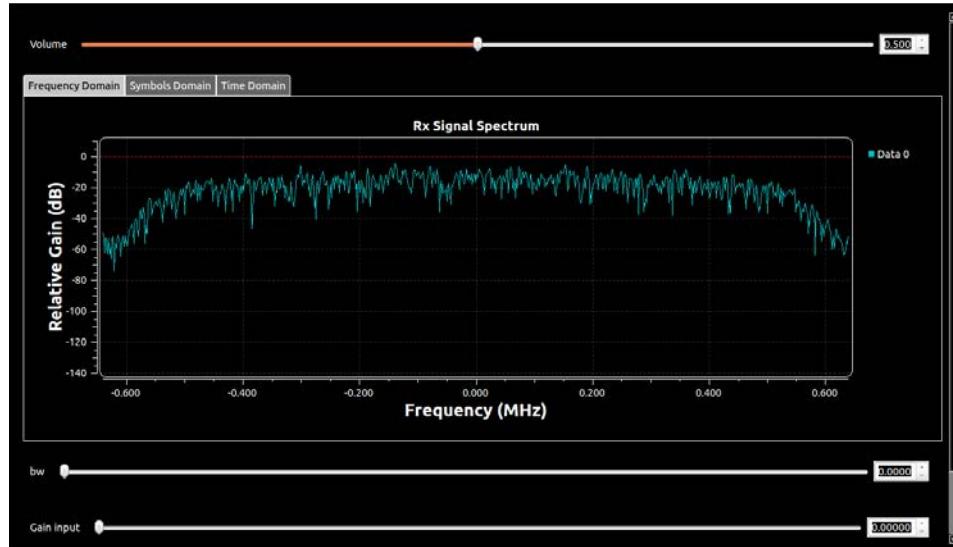
En la figura 93 se muestra la constelación que arroja la demodulación de 8PSK, como se puede ver la constelación recibida no está bien definida debido a las diferentes variables que perturban la señal en el canal.

Figura 93 Constelación Demodulación 8PSK



En la figura 94 se puede apreciar el espectro arrojado en la demodulación 8PSK. En la gráfica se observa que, a mayor cantidad de bits utilizados en las modulaciones, el sistema es más vulnerable al ruido, esto se denota en la imagen donde es poco simétrica en comparación con el espectro transmitido.

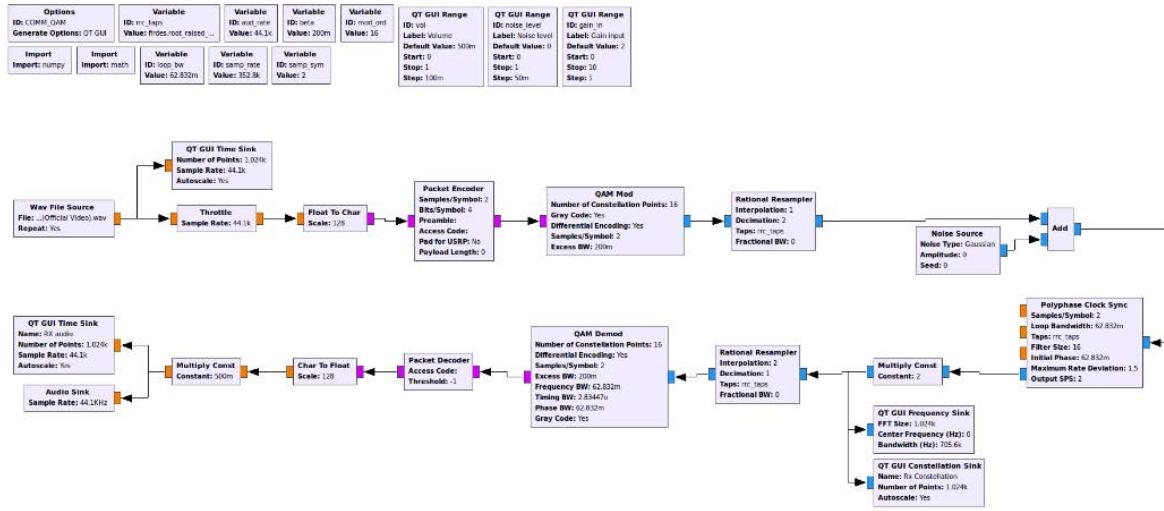
Figura 94 Espectro Demodulación 8PSK



6.4 MODULACIÓN 16QAM

Para las modulaciones y demodulaciones en 16QAM, se presentan de una manera simulada debido a que entre mayor número de símbolos los receptores deben ser completamente sincronos con su transmisión debido a que su aproximación en la constelación debe ser mucho más exactos los puntos para reconstruir la información. A continuación, se mostrará el diagrama de bloques de la figura 95 que corresponde a la modulación de 16QAM.

Figura 95 Diagrama de bloques modulación 16QAM simulado

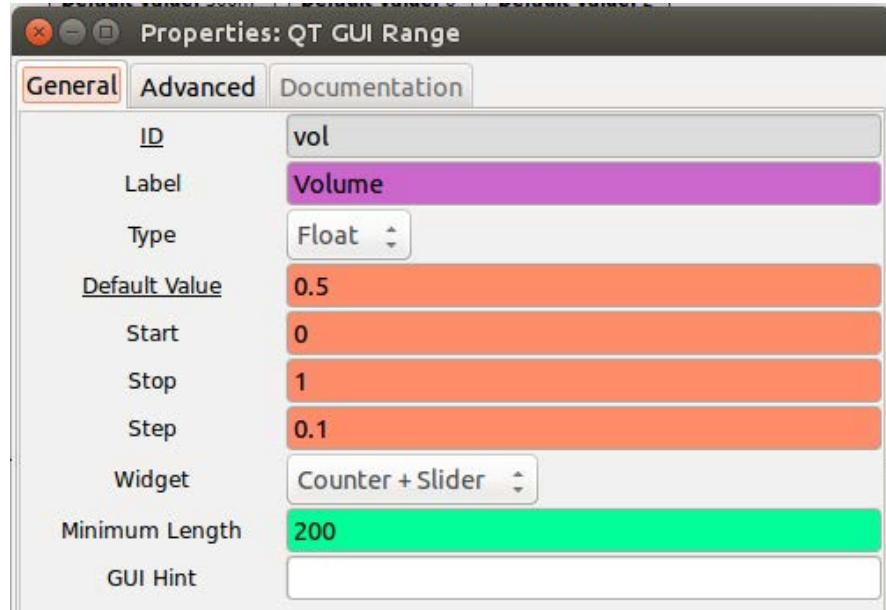


Como hemos observado en las otras constelaciones la configuración de los parámetros para los bloques son modificados muy poco, es por ello por lo que se decide solo explicar los módulos que no aparecen en las otras modulaciones.

Variables:

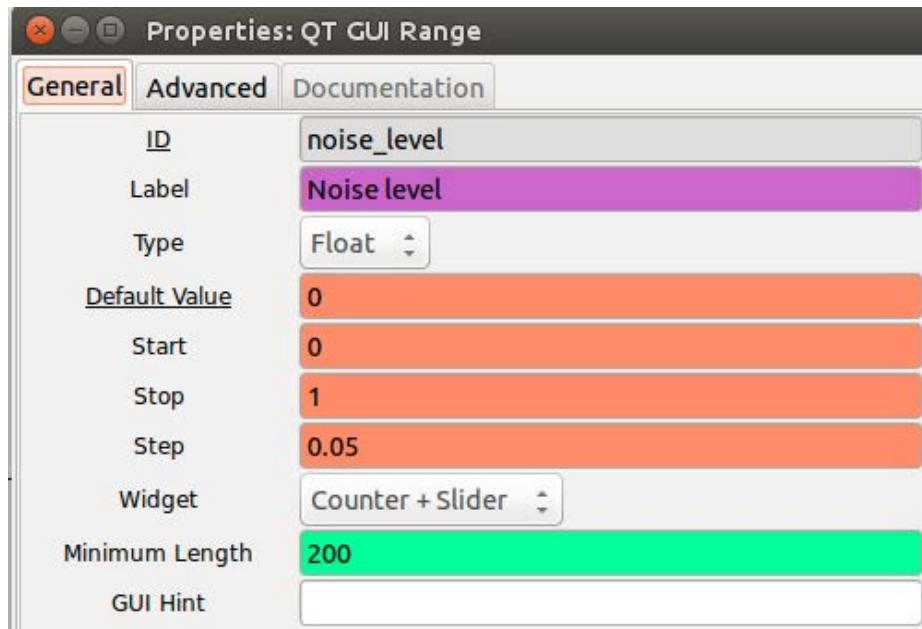
6.4.1 Vol Es el encargado de realizar una ganancia para el volumen de recepción. A continuación, en la figura 96 se muestra su configuración.

Figura 96 Parámetros configuración vol.



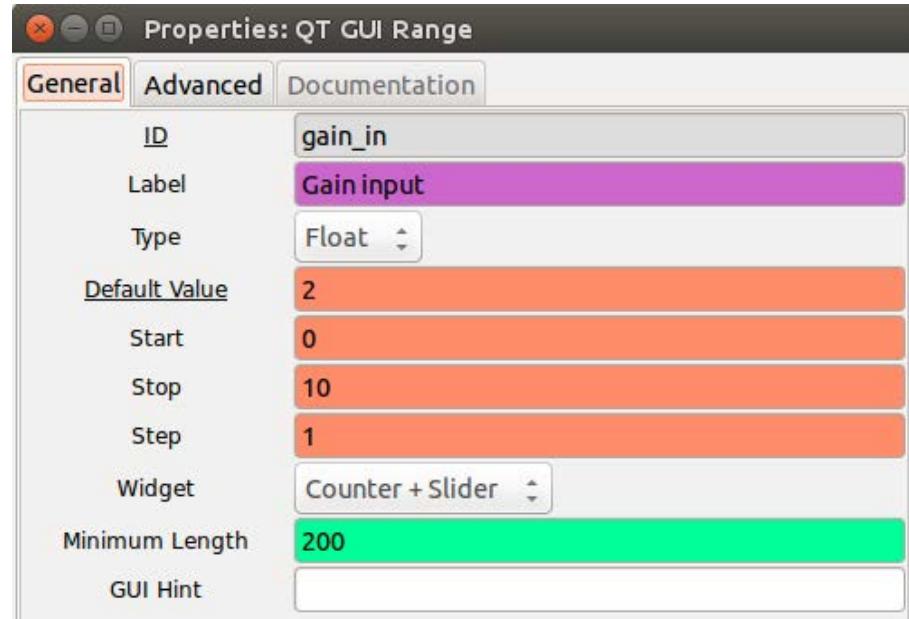
6.4.2 Noise_level Este módulo realiza la introducción de ruido blanco en la modulación. A continuación, se muestra en la figura 97 su configuración.

Figura 97 Parámetros de configuración Noise_level



6.4.3 Gain_in Se encarga de dar una ganancia para amplificar la señal recibida. A continuación, se muestra en la figura 98 la configuración.

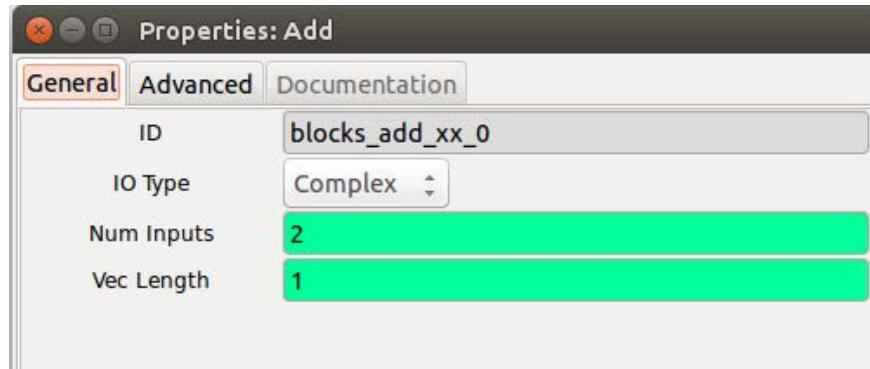
Figura 98 Parámetros de configuración Gain_in



Módulos:

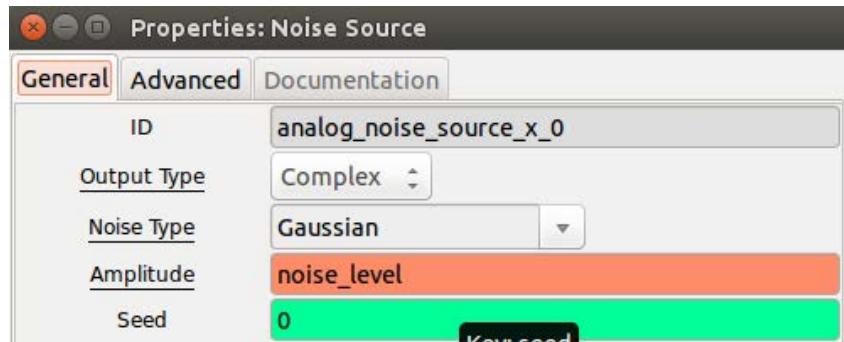
6.4.4 Add suma las perturbaciones de ruido blanco que se introducen para simular el canal para el envío de datos digitales. A continuación, se muestran en la figura 99 su configuración.

Figura 99 Configuración de Parámetros Add



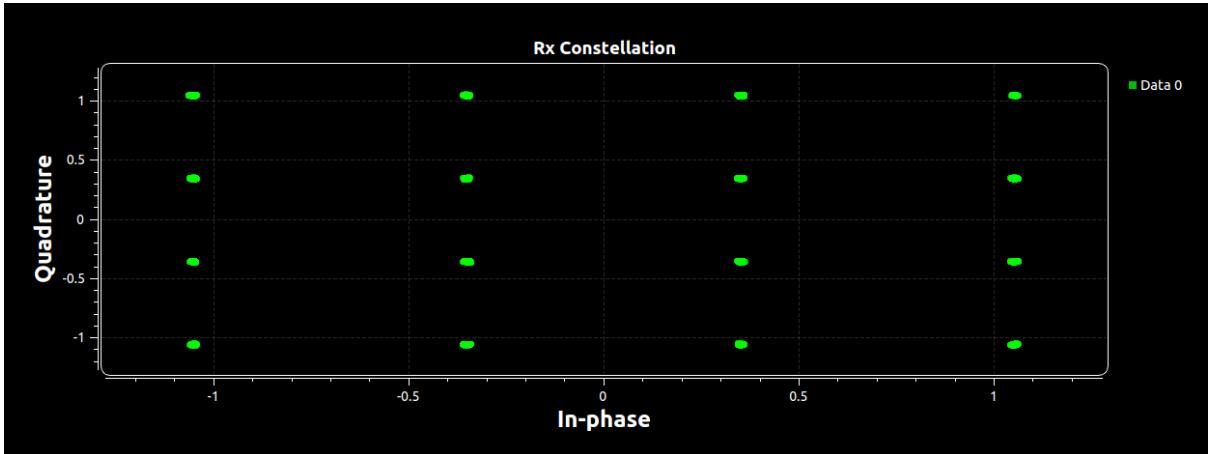
6.4.5 Noise Source Es el módulo encargado de adicionar el ruido en la transmisión o perturbación del sistema de modulación. A continuación, en la figura 100 se muestra la configuración.

Figura 100 Parámetros de Configuración Noise Source



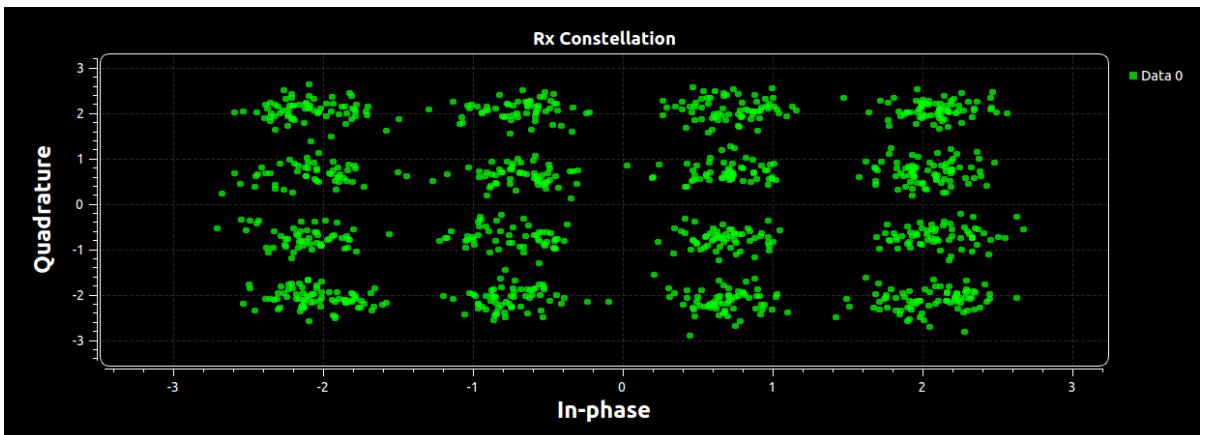
En la figura 101 se muestra la constelación de 16QAM, como se observa en las gráficas anteriores correspondientes al transmisor no existe ninguna distorsión en sus puntos de constelación, sus ángulos son: (-135°, -165°, -45°, -15°, -105°, -135°, -75°, -45°, 135°, 165°, 45°, 15°, 105°, 135°, 75°, 45°), cabe resaltar que su constelación se basa en la modulación de amplitud en cuadratura, donde se tiene en cuenta no solo su fase sino que también se emplea su amplitud.

Figura 101 Constelación 16QAM sin ruido



En la figura 102 se observa la constelación de 16QAM con ruido blanco, en este caso no pudo ser escuchada nuestra canción, esto se debe a que los puntos se encuentran dispersos y la información no puede ser procesada correctamente, debido a que los puntos no se encuentran codificados correctamente debido al ruido que se adiciona en el canal.

Figura 102 Constelación 16QAM con ruido



6.5. ANALISIS DE RESULTADOS

El diagrama de constelación muestra un plano complejo de los estados de los símbolos en su amplitud y fase, en este plano podemos observar el tipo de interferencia y distorsión que puede afectar nuestra transmisión de datos encontrándose los más comunes el ruido blanco aditivo gaussiano, ruido de fase o de interferencia.

Cada punto de constelación representa un símbolo de modulación, lo que conlleva que la constelación transmitida debe ser igual y debe tener el mismo número de símbolos en el receptor para obtener una demodulación óptima con la cantidad mínima de bits errados posibles.

Como herramienta de medición u optimización de la modulación hemos empleado el método visual, analizando el diagrama de constelación y el diagrama de espectro generados por Gnu Radio.

En la figura 37 se puede observar que los puntos de constelación BPSK se encuentran dispersos en el plano, esto es debido al ruido presentado en la transmisión de datos este fenómeno traerá problemas en la interpretación de los símbolos y la perdida de información, en la figura 38 podemos ver que gracias al ruido el espectro del receptor pierde forma y por tal motivo información de datos.

En la figura 65 aunque se ve su constelación 4QAM un poco más definida igual es afectada por el ruido blanco aditivo gaussiano, en este caso su constelación tiende a casi parecer la constelación de transmisión, pero igual se presenta perdida de información e interpretación de los símbolos. En la figura 66 como se mencionó anteriormente el ruido afecta el espectro por tal razón se pierde un poco su forma inicial transmitida.

La figura 93 muestra la recepción de la modulación 8PSK, se observa que los puntos de constelación no son bien definidos como su transmisor, además se observa que cada punto de constelación tiene una gran variedad de puntos dispersos, lo que genera perdida de información y mala interpretación de símbolos. La figura 94 que

corresponde al espectro generado de la modulación 8PSK como anteriormente se observa pierde su forma original, además por el ruido trata de borrar su espectro.

Por último y debido a que el principal inconveniente presentado en esta investigación se debe al ruido aditivo gaussiano al ser mayor el número de bits transmitidos en la modulación de 16QAM, no puedo ser transmitido los datos, por tal razón se mostrara en la figura 102 la simulación de la transmisión de datos con adición de ruido y se mostrara en la figura 101 una transmisión sin que el ruido haya afectado los datos. Entre más puntos tenga la constelación más cercanos estarán los unos a los otros y por lo tanto aumenta la probabilidad de que en la recepción al dispersarse los puntos aumenta considerablemente la cantidad de bits errados en la demodulación. Esto explica porque entre más símbolos tiene la constelación es más difícil lograr una transmisión física correcta, es por esto por lo que la constelación de 16QAM debió ser simulado para poder observar el efecto del ruido en el canal.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los laboratorios realizados en la investigación se observa que la mayoría de documentos no tienen presente algunos parámetros claves para el desarrollo y buen funcionamiento de los ejercicios planteados, además se identifica que los equipos aunque tengan la misma función en cuanto a su modelo puede ser necesario adicionar o sustituir algunos bloques, esto se logra gracias a las diferentes pruebas realizadas en laboratorio y la información extraída de los documentos, videos, tesis, foros y demás información consultada para la realización de modulaciones digitales por medio de la USP1.

Uno de los aspectos más importantes en nuestra modulación digital fue la adición de un módulo en el transmisor que es el encargado de regular la ganancia de la tarjeta secundaria para transmitir la señal, esto igual depende de la distancia en que se encuentren los dispositivos USRP1.

Se encuentra que a mayor número de muestras por símbolo se introduce mayor ruido y por esto se recomienda que el número de muestras por símbolo máximo sea 4 para esta implementación.

Para poder realizar la transmisión y la recepción de datos por medio de las USRP1 se utilizan bandas libres en las frecuencias de 900Mhz y 2.4Ghz, estas bandas generalmente presentan ruido al ser bandas libres ISM, en los laboratorios se utiliza la banda de 900Mhz ya que se presentó menor ruido que en la banda 2.4Ghz, esto es una de las consecuencias por el cual no se pudo realizar la modulación de 16QAM, donde introducía mayor ruido por la distancia en su constelación ya que los puntos son mucho más unidos uno de otro.

En las modulaciones digitales el mayor inconveniente que se presenta es debido al ruido aditivo gaussiano ya que este radio se genera debido a las ondas electromagnéticas y estas están presentes en la mayor parte del espacio.

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA MOLINA, Orlando. Diseño e implementación de un módulo eficiente modulador/ demodulador QAM para GNU Radio. [en línea] En: revista Gerencia Tecnológica Informática. Cali, Colombia Sep-Dic. vol. 15, no. 43, p. 63-77. [Consultado: 04 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/6821/7125>

BLOSSOM, Eric. GNU radio: tools for exploring the radio frequency spectrum. En: Linux journal, 2004, vol. 20, no 122, p. 4.

ELECTRÓNICA FÁCIL. MODULACION DIGITAL: FSK-PSK-QAM [en línea]. En:electronicafacil.net [Consultado: 13 de junio de 2018] Disponible en Internet: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>

ETTUS RESEARCH, a national Instruments Brand. [en línea]. USPR1 [Consultado 10 de Junio de 2018] Disponible en Internet: <https://www.ettus.com/product/details/USRPPKG>

FIRAS, Almoualem, et al. SDR-Based Resilient Wireless Communications. [en línea]. En: 2017 International Conference on Cloud and Autonomic Computing (ICCAC), Tucson, Arizona, USA, 2017, p. 114-119. [Consultado: 05 de enero de 2018]. Disponible en Internet: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8064059>

KERTTULA, Jussi, et al. Implementing TD-LTE as software defined radio in general purpose processor. [en línea]. En: Proceedings of the 2014 ACM workshop on Software radio implementation forum. Chicago, Illinois, USA. Agosto 18-18 de 2014, p. 61-68. [Consultado: 05 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/2630000/2627793/p61-kerttula.pdf?ip=200.3.193.133&id=2627793&acc=OA&key=4D9619BEF5D5941F%>

MERELO, Juan Julián. Historia de la red [En línea]. Introducción a la Internet. Granada. (16 de marzo de 1995), párr. 7. [Consultado: 7 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://kal-el.ugr.es/internet/subsection3_2_2.html

MONTOYA, Ronal. Implementación de moduladores digitales QAM, PSK, GMSK, y GFSK con GNU Radio y el USRP NI 2900. [en línea]. Medellín blog Ronal Montoya's (7 de enero de 2018). Blog. [consultado: 16 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://rdmontoya.wordpress.com/2018/01/07/implementacion-de-moduladores-digitales-m-qam-m-psk-gmsk-y-gfsk-con-gnu-radio-y-el-usrp-ni-2900/>

MUSLIMIN, Jusnaini, et al. SDR-Based Transceiver of Digital Communication System Using USRP and GNU Radio. [en línea]. En: 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Kuala Lumpur, Malaysia, 26-27 de Julio 2016, pp. 449-453. [Consultado: 10 abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7808358/metrics#metrics>.

PINAR DOMINGUEZ, Iván y MURILLO FUENTES, Juan José. Laboratorio de comunicaciones digitales Radio definida por Software. [en línea] Departament de Teoría de la señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla, 2011. p 12 [consultado: 11 de abril de 2017] Disponible en internet: <http://alojoptico.us.es/murillo/LibroSDRV7USv8.pdf>.

TOMASI, Wayne. Introducción a las comunicaciones electrónicas. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4 ed. México: PEARSON EDUCACION. 2013,121p URIBE, José de Jesús, et al. Caracterización de la plataforma de radio definido por software USRP N210-WBX. [en línea] En: Revista GTI, 2013, vol. 12, no 34, p. 91-101. [Consultado: 06 de mayo de 2017]. Disponible en Internet: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagi/article/view/3848/4202>.

WANG, Haijun, et al. Self-adaptive network architecture reconfiguration in CRNs. [en línea]. En: Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Paderborn, Germany, Julio 05-08, ACM, 2016. p. 355-356. [Consultado: 22 de junio de 2017]. Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/2950000/2942396/p355-wang.pdf?ip=200.3.193.133&id=2942396&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=4D96>

ZHAO, Yanxiao, et al. Experimental approach: two-stage spectrum sensing using gnu radio and usrp to detect primary user's signal. [en línea]. En: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on Applied Computing. Pisa, Italy. Abril 04-08 de 2016, p. 2165-2170. [Consultado: 20 de junio de 2017] Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/2860000/2851824/p2165>

ZHAO, Yanxiao, et al. Joint energy-and-bandwidth spectrum sensing with GNU radio and USRP. [en línea] En ACM SIGAPP Applied Computing Review, Diciembre de 2014, vol. 14, no 4, p. 40-49. [Consultado: 15 de Mayo de 2017]. Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/2730000/2724932/p40->

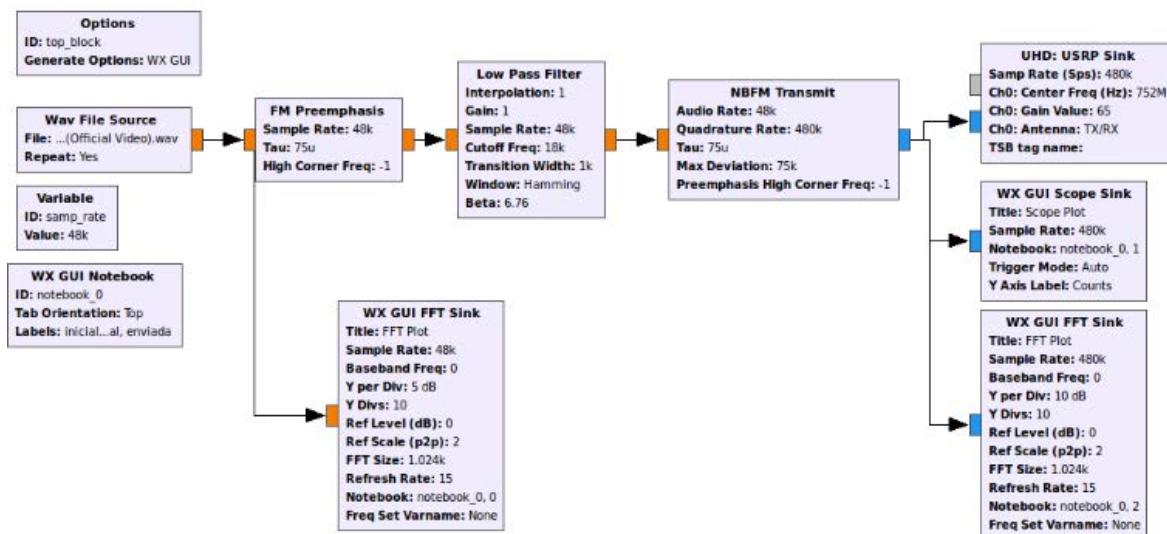
ANEXOS

Anexo A. Sistema de Comunicación FM

Este apartado se centrará en la realización de un sistema FM, tanto transmisor como receptor, a partir de las librerías adecuadas de GNU Radio en las que se implementan los bloques modulador y demodulador de FM para comprender el funcionamiento de la USRP, se tomó la decisión de implementar una transmisión analógica para poder entender cómo funciona GNU RADIO en conjunto con la el hardware antes en mención.

Transmisor FM Como primera alternativa luego de realizar pruebas en los modelos de transmisión y recepción de datos digitales sin ninguna respuesta satisfactoria, se decide montar ejemplos análogos en FM para conocer la herramienta y familiarizarnos con el hardware USPR. A continuación, se mostrará una explicación de los módulos utilizados en la figura 103.

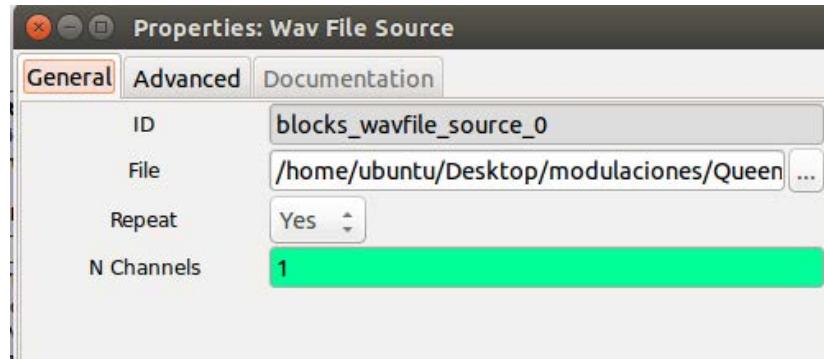
Figura 103 Diagrama de bloques transmisor FM



Wav File Source: es el encargado de realizar la carga de datos que vamos a transmitir, los datos deben ser de tipo .wav debido a que los archivos que empleamos es una canción en este formato. Para cargar el archivo .wav debemos

seleccionar en la parte de file y buscar la canción que deseamos transmitir. Si el usuario quiere que la carga del archivo se repite debe seleccionar la opción yes en Repeat. En la figura 104 se muestran la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 104 Parámetros wavfile file source



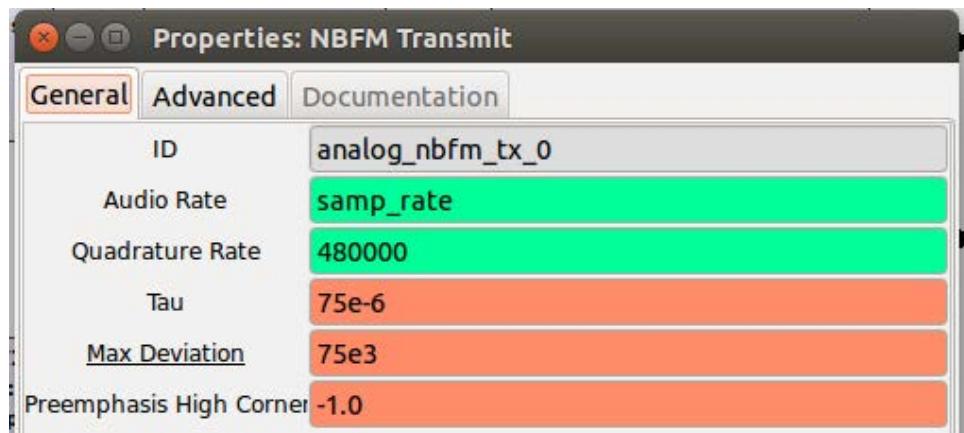
Low Pass Filter: es un filtro pasa bajo que se utiliza para filtrar las señales de ruido, en cuanto a las variables se define lo siguiente: FIR Type: se utiliza para el tipo de dato que vamos a utilizar; Decimation: realiza el cambio de frecuencia de muestreo en nuestro sistema; Gain: es una ganancia adicional para amplificar nuestra señal; Sample Rate: es la frecuencia de muestreo en que se transmite la canción, la frecuencia de muestreo para el controlador de audio de un computador puede ser 48Khz, 44.1Khz, 32Khz; Cutoff Freq: frecuencia de corte. En la figura 105 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 105 Parámetros Low Filter



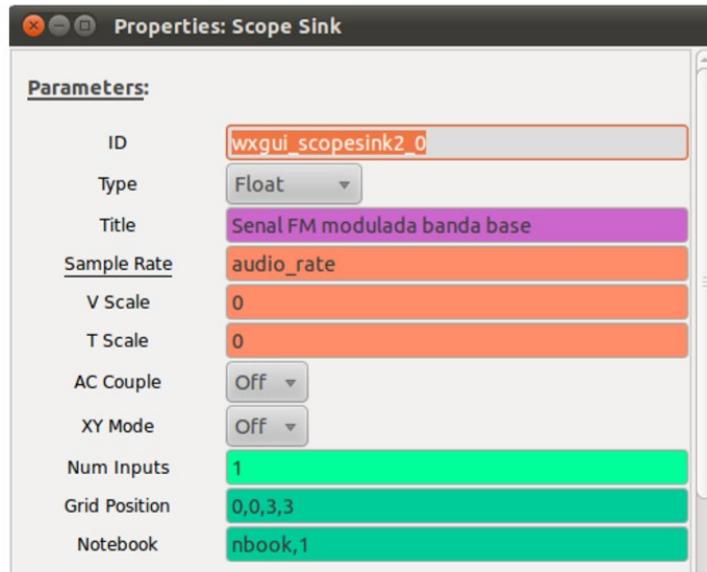
NBFM Transmit: es el encargado de realizar la interpolación para ajustar la frecuencia de muestreo con la frecuencia de raíz, en este caso se utiliza una frecuencia de 48Khz. Audio Rate: Es la frecuencia que se utiliza para la transmisión del archivo de audio .wav; Quadrature Rate: es el dato de interpolación que debe realizarse para poder enviar los datos por vía USB, Esto se debe a que la frecuencia de muestreo máxima de la USRP es de 128Mhz y la frecuencia de muestreo de nuestro archivo es de 48khz. En la figura 106 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 106 Parámetros NBFM Transmit



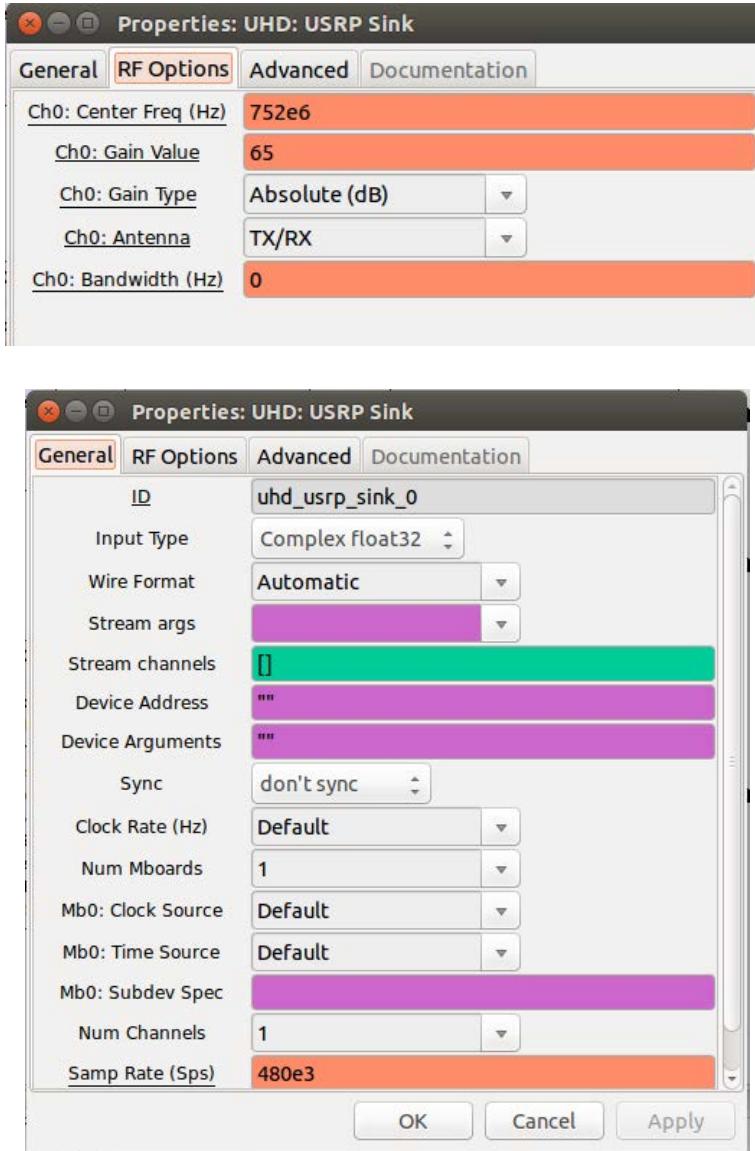
Scope Sink: muestra imágenes de las señales transmitidas, en otras palabras, es un osciloscopio o analizador de espectros; Sample Rate: frecuencia de muestreo; Grid Position: es la posición donde se muestran las imágenes, esto porque la interfaz puede mostrar distintas imágenes a la vez; Notebook: Selecciona la ventana para mostrar la imagen. En la figura 107 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 107 Parámetros Scope Sink



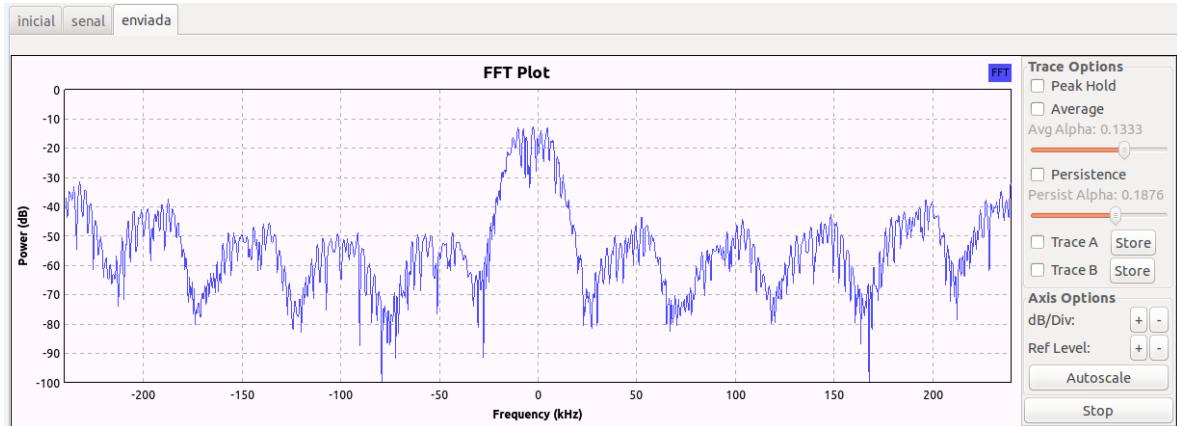
UHD USRP Sink: se usa para configurar los datos de la modulación en cuanto al ancho de banda, la frecuencia de la banda que se utiliza, ganancia para la tarjeta madre y se selecciona la antena a utilizar; Samp Rate: es el ancho de banda que se utiliza para la transmisión de los datos; Ch0: Center Freq (Hz): es la frecuencia de la moduladora que se utiliza; Ch0: Gain: Ganancia de la transmisión; Ch0: Antena: selecciona la antena a utilizar, puede ser TX/RX o RX2. En la figura 108 se muestra la configuración de los parámetros para este módulo.

Figura 108 Parámetros UHD: USRP Sink



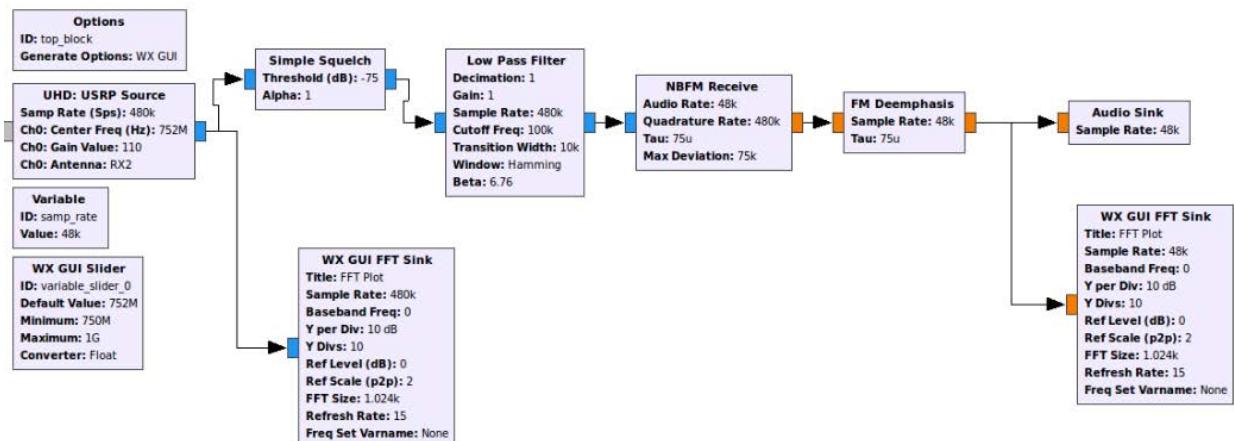
A continuación, se muestra en la figura 109 el espectro de la canción que genera la transmisión en FM.

Figura 109 Espectro Transmitido en FM



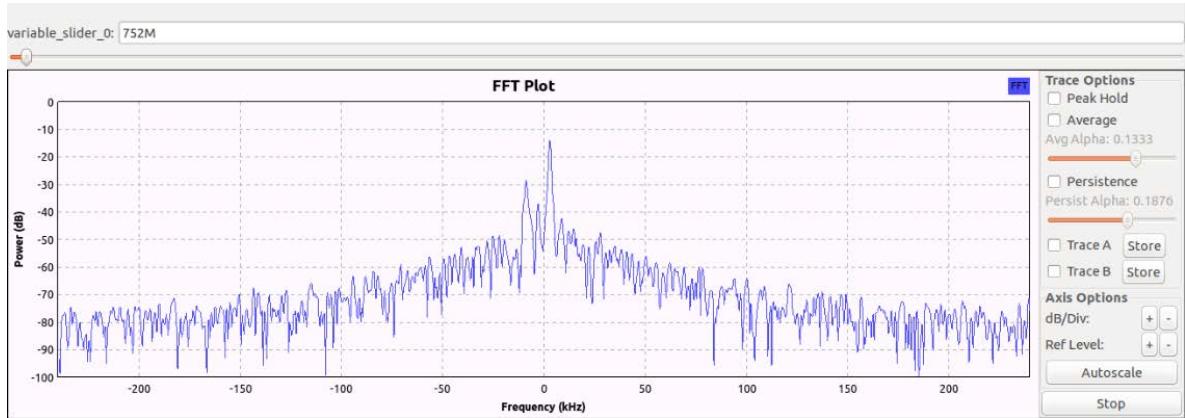
Receptor FM Para realizar la recepción de FM se utilizará casi los mismos módulos utilizados en la transmisión de FM, la única variante que existe es que los módulos se invierten. A continuación, se muestra en la figura 110 un esquema implementado en la recepción de datos de FM

Figura 110 Diagrama de bloques Receptor FM



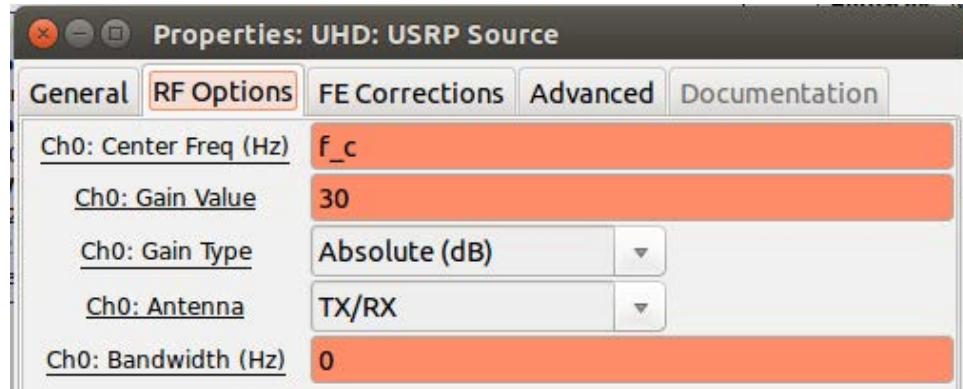
Para entender nuestro diagrama de bloques de recepción FM empezaremos con la figura 111 donde muestra el espectro de la señal recibida, esta imagen muestra el inicio de la canción, seguido se mostrarán los parámetros que se modifican en cada uno de los módulos que conforman el receptor FM.

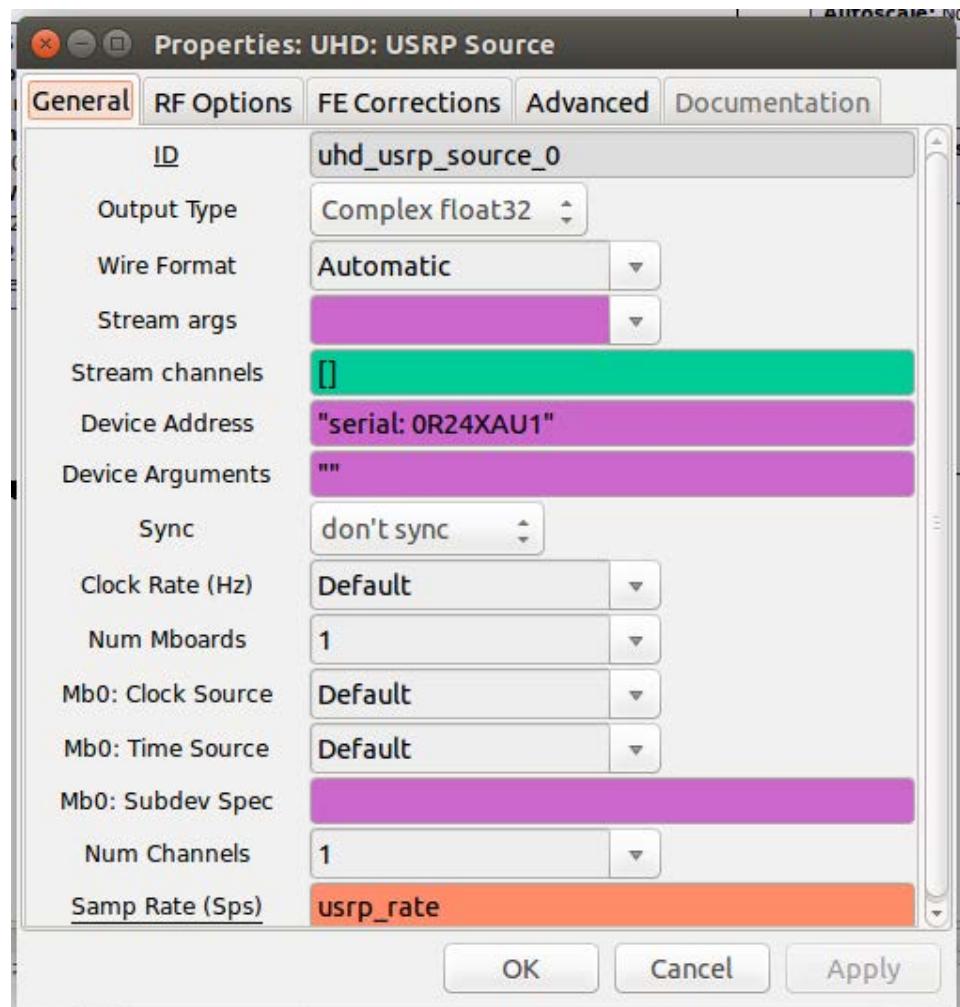
Figura 111 Espectro recibido FM



UHD: USRP Source: Este módulo es el encargado de recibir los datos por medio de su tarjeta configurada como receptora, además establece el ancho de banda, su frecuencia banda base, asigna una ganancia y selecciona la tarjeta adecuada para la recepción de datos. Como dato adicional el ancho de banda del canal debe ser el mismo que el utilizado en la transmisión, así como la frecuencia base. En la figura 112 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 112 Parámetros USRP Source

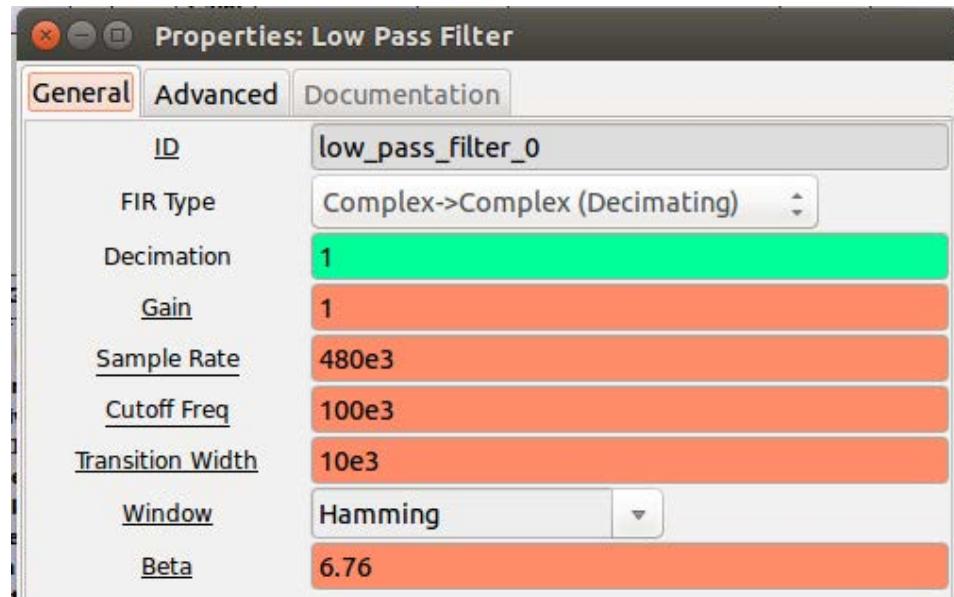




Simple Squelch: se utiliza para eliminar el ruido que se pueda adicionar en la modulación. La configuración de este módulo no se adiciona imagen debido a que no se modifica.

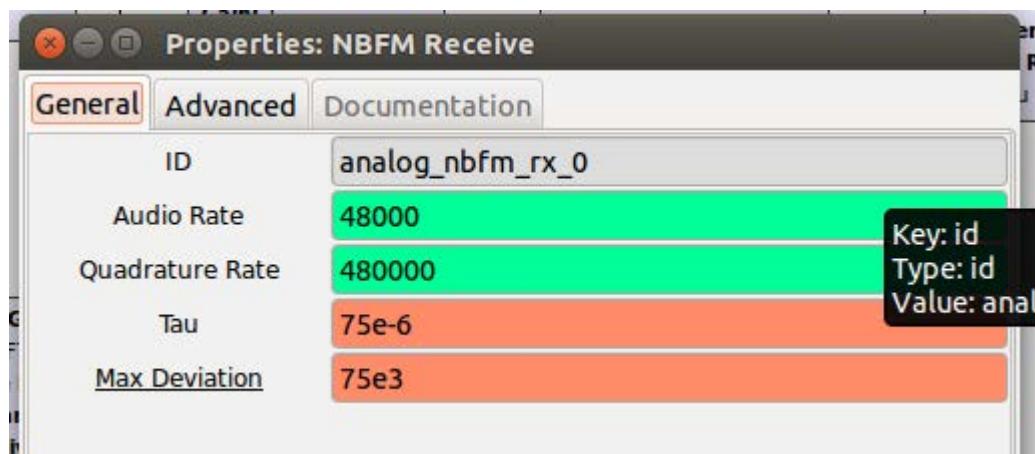
Low Pass Filter filtro pasa bajo, se utiliza para acondicionar la señal y que pueda ser diezmada sin interferencias. Sample Rate: frecuencia de muestreo de entrada; Cutoff Freq: frecuencia de corte. En la figura 113 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 113 Parámetros Low Pass Filter



NBFM Receive: Se encarga de realizar el decimador para ajustar nuevamente a la frecuencia de trabajo de la tarjeta de audio que en este caso es de 48Khz. Los parámetros son los mismos que NBFM Transmit. En la figura 114 se muestra la configuración de los parámetros de este módulo.

Figura 114 Parámetros NBFM Receive



FM Deemphasis: se utiliza para mejorar la relación señal a ruido.

Audio Sink: es la encargada de seleccionar la frecuencia de muestreo de la tarjeta de audio del computador para poder ser escuchada la canción transmitida.