



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

TITULO

Desarrollo de un entorno de simulación de modulaciones de radio NFM, AM y QPSK mediante tecnología SDR

AUTOR

Reyes Yagual Leonardo Fabricio

TRABAJO DE TITULACION

Trabajo complejo, previo a la obtención del título:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Ing. Jaramillo Chamba Daniel Armando

La Libertad, Ecuador

2024

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a mis queridos padres, Leonardo y Flora, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y el motivo detrás de cada uno de mis logros, desde siempre, su amor incondicional, su ejemplo de trabajo arduo y su constante apoyo han sido mi mayor inspiración, me han enseñado el verdadero significado de la perseverancia, la humildad y el valor de los sueños, mostrándome que con esfuerzo y fe todo es posible. Su guía y sacrificio han marcado mi camino, y cada paso que doy es un reflejo de los valores que me han inculcado.

A mis hermanas, mis compañeras de vida y mis mayores cómplices, gracias por estar siempre a mi lado, por compartir risas, retos y momentos inolvidables, su apoyo, cariño y fe en mí han sido fundamentales en este camino.

A mi querida abuelita Catalina, cuyo amor y sabiduría continúan iluminando mi vida, incluso en su ausencia, siento su presencia en cada paso que doy, y este logro también es para ella, con todo mi amor y gratitud eterna.

A Dios, quien ha sido mi guía, mi refugio y mi mayor fortaleza en los momentos de incertidumbre. A través de su gracia, he aprendido que los retos son oportunidades para crecer y que cada paso dado con fe encuentra su recompensa.

Leonardo Reyes Yagual

AGRADECIMIENTO

A mis padres, quienes han sido el fundamento de mi vida y mi mayor ejemplo de amor, esfuerzo y dedicación, no hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí. Su apoyo incondicional, sus sabios consejos y su fe constante en mí han sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante.

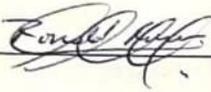
Agradezco a mi pareja, Victoria, mi apoyo, mi compañera y mi inspiración, gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, has estado desde que empecé hasta que terminé esta carrera, compartiendo mis sueños, mis retos y mis logros, tus palabras de aliento y tu fe en mí han sido una fuente constante de motivación, eres mi mayor bendición y una de las razones por las que he llegado hasta aquí. Este logro también es tuyo, porque has estado presente en cada momento, celebrando mis victorias y sosteniéndome en las caídas.

A mis amigos, esas personas invaluable que han hecho de este camino algo más ligero y significativo, agradezco profundamente su apoyo, su lealtad y las innumerables veces que me han hecho reír cuando más lo necesitaba; ustedes han sido un pilar importante, ofreciendo palabras de aliento, buenos consejos y, sobre todo, su amistad sincera. Gracias por estar ahí en cada etapa de este proceso, por escucharme cuando lo necesitaba y por celebrarlo todo conmigo.

A cada uno de ustedes, padres, mi pareja y mis amigos, les agradezco con todo mi corazón por ser parte de mi vida y por ayudarme a ser quien soy hoy. Este logro no sería lo mismo sin el amor, la confianza y la alegría que han compartido conmigo.

Leonardo Reyes Yagual

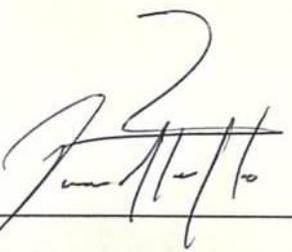
TRIBUNAL DE SUSTENTACION DE TRABAJO DE INTEGRACION
CURRICULAR



Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph.D
DIRECTOR DE LA CARRERA



Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr
DOCENTE GUIA ESPECIALISTA



Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr
DOCENTE TUTOR

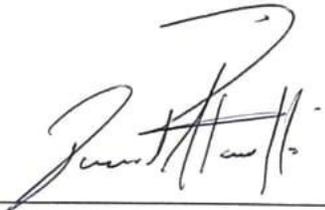


Ing. Corina Gonzabay De la A, Mgtr
SECRETARIA

APROBACIÓN DE DOCENTE TUTOR

En mi calidad de docente tutor del trabajo de Integración Curricular denominado: “Desarrollo de un entorno de simulación de modulaciones de radio NFM, AM y QPSK mediante tecnología SDR”, elaborado por Reyes Yagual Leonardo Fabricio, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniería en Telecomunicaciones, me permito declarar que, tras supervisar el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos. En consecuencia, lo considero apto en todos sus aspectos y listo para ser evaluado por el docente especialista.

Atentamente



Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.

DOCENTE TUTOR

DECLARACIÓN AUTORÍA DE LAS ESTUDIANTES

El presente trabajo de Integración Curricular con el título “Desarrollo de un entorno de simulación de modulaciones de radio NFM, AM y QPSK mediante tecnología SDR”, declaro que la concepción análisis y resultados son originales a la actividad educativa en el área de Telecomunicaciones.

Atentamente



Reyes Yagual Leonardo Fabricio

C.I.: 2450476920

DECLARACIÓN DE DOCENTE ESPECIALISTA

En mi calidad de docente especialista del trabajo de Integración Curricular, "Desarrollo de un entorno de simulación de modulaciones de radio NFM, AM y QPSK mediante tecnología SDR", elaborado por Reyes Yagual Leonardo Fabricio, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniería en Telecomunicaciones, me permito declarar que, tras supervisar el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos. En consecuencia, lo considero apto en todos sus aspectos y listo para la sustentación del trabajo.

Atentamente



Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr

DOCENTE ESPECIALISTA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Quienes suscriben, Reyes Yagual Leonardo Fabricio con Cédula de Identidad 2450476920, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones, declaramos que el trabajo de titulación denominada "Desarrollo de un entorno de simulación de modulaciones de radio NFM, AM y QPSK mediante tecnología SDR" pertenece y es exclusiva responsabilidad del autor y pertenece al patrimonio intelectual de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Atentamente



Reyes Yagual Leonardo Fabricio

C.I.: 2450476920

Resumen

El desarrollo de entornos de simulación utilizando la tecnología SDR con HackRF One y SDRAngel fue fundamental para comprender las modulaciones NFM, AM y QPSK; este proceso requirió la integración efectiva de hardware y software, lo que permitió que ambos trabajaran en conjunto de manera armoniosa, estos entornos sirvieron como espacios prácticos para experimentar con diversas configuraciones de comunicación, estableciendo una base sólida tanto para fines educativos y experimentales. Durante los experimentos se pudo observar cómo las modulaciones funcionan en un contexto práctico, analizando la influencia de los factores, esto expuso los retos reales asociados con estos procesos, los experimentos ofrecieron una visión clara de las aplicaciones de estas modulaciones. Las guías elaboradas para estudiantes se destacaron por su claridad y enfoque práctico, incluyendo ejemplos detallados y recomendaciones, estas guías representan un recurso valioso para aprender y aplicar el uso de HackRF One y SDRAngel, proporcionando confianza a los usuarios interesados en profundizar en el tema.

Palabras clave: SDR, modulación, señales, comunicación, experimentos

Abstract

The development of simulation environments using SDR technology with HackRF One and SDRAngel was fundamental for understanding NFM, AM, and QPSK modulations. This process required the effective integration of hardware and software, allowing both to work together harmoniously. These environments served as practical spaces to experiment with various communication configurations, establishing a solid foundation for both educational and experimental purposes. During the experiments, it was possible to observe how modulations function in a practical context, analyzing the influence of different factors. This exposed the real challenges associated with these processes, and the experiments provided a clear understanding of the applications of these modulations. The guides created for students stood out for their clarity and practical focus, including detailed examples and recommendations. These guides represent a valuable resource for learning and applying the use of HackRF One and SDRAngel, offering confidence to users interested in exploring the subject further.

Keywords: SDR, modulation, signals, communication, experiments

INDICE

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Objetivo general | 18 |
| Objetivos específicos..... | 18 |
| Metodología..... | 19 |
| • Revisión bibliográfica y preparación | 19 |
| • Diseño y configuración..... | 19 |
| • Ejecución y evaluación de los experimentos prácticos..... | 19 |
| CAPITULO I..... | 20 |
| 1.1. Introducción | 20 |
| 1.1.1. Identificación del problema | 21 |
| 1.1.2. Justificación | 22 |
| 1.1.3. Alcances | 23 |
| 1.2. Revisión bibliográfica..... | 23 |
| 1.2.1. Radio Definida Por Software | 23 |
| 1.2.2. Modulaciones analógicas y digitales | 25 |
| 1.2.2.1. AM (Amplitude Modulation - Modulación en Amplitud) | 25 |
| 1.2.2.2. FM (Frequency Modulation - Modulación de Frecuencia)..... | 26 |
| 1.2.2.3. Modulaciones digitales | 27 |
| 1.2.3. Modulación De Frecuencia De Banda Estrecha (NFM)..... | 28 |
| 1.2.4. Modulación de Amplitud (AM) | 29 |
| 1.2.5. Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK)..... | 30 |
| 1.2.6. Código Morse..... | 31 |
| 1.2.7. Parámetros generales de simulación | 31 |
| 1.2.8. Televisión Digital Amateur (DATV)..... | 33 |

| | | |
|------------------|------------------------------------------------------------|----|
| 1.3. | Descripción de herramientas y equipo utilizado | 33 |
| 1.3.1. | HackRF One..... | 33 |
| 1.3.1.1. | Especificaciones técnicas del dispositivo HackRF One | 34 |
| 1.3.2. | Software para SDR | 35 |
| 1.3.2.1. | SDRAngel..... | 36 |
| 1.3.2.2. | Requisitos de Hardware | 38 |
| 1.3.2.3. | Proceso de instalación de software SDRAngel..... | 38 |
| 1.3.2.4. | DATV en SDRAngel..... | 39 |
| CAPITULO II..... | | 42 |
| 2.1. | Arquitectura del sistema | 42 |
| 2.2. | Parámetros de transmisión y recepción en SDRAngel | 42 |
| 2.2.1. | Complemento de entrada HackRF (recepción)..... | 42 |
| 2.2.2. | Complemento de salida HackRF (transmisión) | 46 |
| 2.2.2.1. | Componente del espectro..... | 49 |
| 2.2.3. | Complemento de la modulación NFM..... | 53 |
| 2.2.3.1. | Complemento demodulador NFM | 53 |
| 2.2.3.2. | Complemento modulador NFM..... | 55 |
| 2.2.4. | Complementos de la modulación AM..... | 59 |
| 2.2.4.1. | Complemento demodulador AM..... | 59 |
| 2.2.4.2. | Complemento modulador AM | 61 |
| 2.2.5. | Complemento DATV (modulación QPSK) | 63 |
| 2.2.5.1. | Complemento demodulador DATV | 63 |
| 2.2.5.2. | Complemento modulador DATV | 70 |
| 2.3. | Especificaciones técnicas del entorno de simulación | 73 |

| | | |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1. | Parámetros de configuración para modulación NFM: Práctica 1: | 73 |
| 2.3.2. | Parámetros de configuración para modulación AM: Práctica 2: | 76 |
| 2.3.3. | Parámetros de configuración para modulación QPSK: Práctica 3: | 79 |
| CAPITULO III | | 82 |
| 3.1. | Ejecución de los experimentos..... | 82 |
| 3.1.1. | Preparación del entorno de pruebas | 82 |
| 3.1.1.1. | Interconexión del hardware..... | 82 |
| 3.1.1.2. | SDRAngel: apertura del software y creación de espacio de trabajo | 83 |
| 3.1.1.3. | Formato de archivo para transmisión DATV | 84 |
| 3.1.2. | Práctica 1: transmisión y recepción de señales NFM | 85 |
| 3.1.3. | Práctica 2: transmisión y recepción de señales AM..... | 91 |
| 3.1.4. | Práctica 3: transmisión y recepción de señales QPSK..... | 96 |
| 3.1.5. | Análisis de resultados | 102 |
| 3.1.5.1. | Análisis Práctica 1: transmisión y recepción de señales NFM | 102 |
| 3.1.5.2. | Práctica 2: transmisión y recepción de señales AM..... | 104 |
| 3.1.5.3. | Práctica 3: transmisión y recepción de señales QPSK..... | 105 |
| 3.1.6. | Evaluación del sistema..... | 107 |
| 3.1.7. | Conclusiones | 108 |
| 3.1.8. | Recomendaciones | 109 |
| Bibliografía..... | | 109 |

INDICE DE TABLAS

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. | Características generales de tipos de SDR más comunes..... | 24 |
| Tabla 2. | Características generales de algunos tipos de software para SDR | 35 |
| Tabla 3. | Esquema de espaciado de canal..... | 56 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. | Interfaces de modulaciones AM de recepción en SDRAngel. | 26 |
| Ilustración 2. | Interfaces de modulaciones FM, tanto de transmisión como recepción, en SDRAngel. | 27 |
| Ilustración 3. | Modulaciones digitales en SDRAngel, en demodulador DATV. | 28 |
| Ilustración 4. | Diagrama de constelación de modulación QPSK. | 31 |
| Ilustración 5. | Dispositivo SDR, HackRF One. | 34 |
| Ilustración 6. | Complementos de SDRAngel. | 37 |
| Ilustración 7. | Enlace de descarga de SDRAngel..... | 38 |
| Ilustración 8. | Proceso de instalación de SDRAngel..... | 39 |
| Ilustración 9. | Televisión Digital Amateur, como demodulador y modulador en SDRAngel. | 41 |
| Ilustración 10. | Conexiones del sistema, para transmisión y/o recepción de señales de SDR. | 42 |
| Ilustración 11. | Interfaz del complemento de entrada HackRF..... | 43 |
| Ilustración 12. | Parámetros comunes de transmisión en complemento de entrada HackRF..... | 43 |
| Ilustración 13. | Interfaz del complemento de entrada HackRF..... | 46 |
| Ilustración 14. | Latencia vs. Frecuencia de muestreo. | 47 |
| Ilustración 15. | Componente del espectro..... | 49 |
| Ilustración 16. | Controles del complemento del espectro | 50 |
| Ilustración 17. | Interfaz del demodulador NFM en SDRAngel. | 54 |
| Ilustración 18. | Interfaz del modulador NFM de SDRAngel..... | 56 |
| Ilustración 19. | Control de fuente de entrada en complemento modulador NFM..... | 58 |

| | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 20. | Complemento demodulador AM en SDRAngel | 60 |
| Ilustración 21. | Complemento modulador AM en SDRAngel | 62 |
| Ilustración 22. | Interfaz general de DATV en SDRAngel..... | 64 |
| Ilustración 23. | Interfaz detallada de la sección DATV en SDRAngel. | 65 |
| Ilustración 24. | Interfaz de configuración de señal DATV en SDRAngel. | 66 |
| Ilustración 25. | Interfaz de transmisión de video en DATV en SDRAngel. | 69 |
| Ilustración 26. | Interfaz del modulador DATV en SDRAngel. | 70 |
| Ilustración 27. | Configuración para Práctica 1 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: transmisión... 73 | |
| Ilustración 28. | Configuración para Práctica 1 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción..... 74 | |
| Ilustración 29. | Configuración para Práctica 1 de complemento ‘NFM Modulator’ en SDRAngel: transmisión.....75 | |
| Ilustración 30. | Configuración para Práctica 1 de complemento ‘NFM Demodulator’ en SDRAngel: recepción.....75 | |
| Ilustración 31. | Configuración para Práctica 2 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: transmisión... 76 | |
| Ilustración 32. | Configuración para Práctica 2 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción..... 77 | |
| Ilustración 33. | Configuración para Práctica 2 de complemento ‘AM Modulator’ en SDRAngel: transmisión.....78 | |
| Ilustración 34. | Configuración para Práctica 2 de complemento ‘AM Demodulator’ en SDRAngel: recepción.....78 | |
| Ilustración 35. | Configuración para Práctica 3 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: transmisión... 79 | |
| Ilustración 36. | Configuración para Práctica 3 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción..... 80 | |
| Ilustración 37. | Configuración para Práctica 3 de complemento ‘DATV Modulator’ en SDRAngel: transmisión.....80 | |
| Ilustración 38. | Configuración para Práctica 3 de complemento ‘DATV Demodulator’ en SDRAngel: recepción.....81 | |
| Ilustración 39. | Diagrama de conexiones del sistema SDR para práctica 1..... 82 | |
| Ilustración 40. | Diagrama de conexiones del sistema SDR para práctica 3..... 83 | |
| Ilustración 41. | Conexión exitosa de hardware HackRF One | 83 |

| | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 42. | Nuevo espacio de trabajo en SDRAngel..... | 84 |
| Ilustración 43. | Interfaz de conversor de archivos Convertio | 85 |
| Ilustración 44. | Carga de archivo .mp4 para convertir a .ts | 85 |
| Ilustración 45. | Descarga de archivo convertido a .ts | 85 |
| Ilustración 46. | Conexiones del hardware de práctica 1..... | 86 |
| Ilustración 47. | Agregar dispositivo HackRF de transmisión en SDRAngel..... | 86 |
| Ilustración 48. | Interfaz de HackRF como receptor en SDRAngel..... | 87 |
| Ilustración 49. | Agregar canal <i>NFM Modulator</i> para transmisión para HackRF en SDRAngel..... | 87 |
| Ilustración 50. | Configuración de transmisión en NFM en SDRAngel, práctica 1..... | 88 |
| Ilustración 51. | Dispositivos de transmisión en SDRAngel..... | 88 |
| Ilustración 52. | Agregar canal <i>NFM Demodulator</i> para recepción para HackRF en SDRAngel. | 89 |
| Ilustración 53. | Configuración de recepción en NFM en SDRAngel, práctica 1..... | 89 |
| Ilustración 54. | Generación de señal NFM | 90 |
| Ilustración 55. | NFM Modulator: configuración de CW | 90 |
| Ilustración 56. | Transmisión exitosa de señal utilizando modulación NFM en SDRAngel..... | 91 |
| Ilustración 57. | Recepción exitosa de señal utilizando modulación NFM utilizando SDRAngel..... | 91 |
| Ilustración 58. | Conexiones de hardware para práctica 2 | 92 |
| Ilustración 59. | Interfaces de transmisión para modulación AM en SDRAngel, práctica 2..... | 92 |
| Ilustración 60. | Configuración de transmisión en AM de práctica 2..... | 93 |
| Ilustración 61. | Complementos de recepción de práctica 2..... | 93 |
| Ilustración 62. | Configuración de interfaces de recepción de práctica 2 | 94 |
| Ilustración 63. | AM Modulator: activación de micrófono | 94 |
| Ilustración 64. | Transmisión exitosa de señal de voz en tiempo real utilizando modulación AM | 95 |
| Ilustración 65. | Recepción exitosa de señal de voz en tiempo real utilizando modulación AM | 95 |
| Ilustración 66. | Conexiones físicas de dispositivos HackRF One para práctica 2. | 96 |
| Ilustración 67. | Complementos de transmisión de la práctica 3..... | 96 |

| | | |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 68. | Complementos de transmisión y recepción de práctica 3 | 97 |
| Ilustración 69. | Configuración de parámetros de transmisión de práctica 3 | 98 |
| Ilustración 70. | Configuración de parámetros de recepción de práctica 3 | 98 |
| Ilustración 71. | Proceso de carga de archivo con formato compatible para DATV Modulator | 99 |
| Ilustración 72. | Inicio de transmisión y recepción de señal utilizando DATV por medio de modulación QPSK..... | 99 |
| Ilustración 73. | Diagrama de constelación para QPSK en SDRAngel, complemento DATV | 100 |
| Ilustración 74. | Reproducción de video cargado con formato .ts en DATV | 100 |
| Ilustración 75. | Reproducción de video recibido en DATV utilizando modulación QPSK | 101 |
| Ilustración 76. | Transmisión y recepción exitosa de señal utilizando DATV por medio de modulación QPSK en SDRAngel..... | 102 |
| Ilustración 77. | Espectro de transmisión de señal de práctica 1: NFM..... | 103 |
| Ilustración 78. | Espectro de recepción de señal de práctica 1: NFM | 104 |
| Ilustración 79. | Espectro de transmisión de señal de práctica 2: AM | 104 |
| Ilustración 80. | Espectro de recepción de señal de práctica 2: AM..... | 105 |
| Ilustración 81. | Espectro estilo gradiente de recepción y transmisión de señal de práctica 3: QPSK..... | 106 |
| Ilustración 82. | Análisis de datos de recepción en DATV..... | 107 |

Objetivos

Objetivo general

Analizar y desarrollar prácticas de laboratorio de SDR mediante la transmisión y recepción de señales de audio y video, utilizando HackRF One y SDRAngel, para mejorar la comprensión de la modulación NFM, AM y QPSK, de los estudiantes para los desafíos tecnológicos en telecomunicaciones.

Objetivos específicos

1. Diseñar y configurar un entorno de simulación por medio de Software Definido por Radio (SDR), utilizando HackRF One y SDRAngel para el análisis de las modulaciones NFM, AM y QPSK.
2. Ejecutar y evaluar los experimentos prácticos de transmisión y recepción de señales utilizando modulaciones de radiofrecuencia NFM, AM y QPSK.
3. Elaborar guías documentadas para estudiantes y docentes sobre el uso de SDRANGEL y el HackRF One.

Metodología

En este proyecto incluye:

- **Revisión bibliográfica y preparación**

El autor revisará algunos conceptos teóricos, importantes sobre las modulaciones NFM, AM y QPSK; se realizarán lecturas (técnicas) y se discutirán los principios de operación de cada modulación, así mismo el uso de SDR en sistemas de comunicación, esto proporcionará una base sólida para la implementación práctica.

- **Diseño y configuración**

En esta fase, se realizará el diseño y la configuración de un entorno de simulación utilizando la tecnología de Software Definido por Radio (SDR), específicamente con el hardware HackRF One y el software SDRAngel.

- **Ejecución y evaluación de los experimentos prácticos**

Se ejecutarán experimentos de transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia utilizando las modulaciones NFM, AM y QPSK, en donde se evalúan la eficiencia del sistema; con los resultados obtenidos de los experimentos prácticos, se realizará una documentación sobre el proceso completo, incluyendo el uso de SDRAngel y HackRF One, así como la configuración de las modulaciones y los resultados observados.

CAPITULO I

1.1. Introducción

Desde una perspectiva tecnológica, las telecomunicaciones han dado un salto gigantesco en las últimas décadas, cambiando la forma en que las personas se comunican y comparten información. El SDR ha emergido como una tecnología disruptiva que está redefiniendo el diseño, implementación y gestión de los sistemas de comunicación. El SDR permite a los ingenieros y profesionales de las telecomunicaciones modificar funciones de hardware a nivel de software, lo que brinda una flexibilidad sin precedentes en el estudio, simulación y optimización de sistemas de radio. La tecnología parece bastante relevante dentro del campo educativo, ya que permite a los estudiantes realizar experimentos en tiempo real sobre sistemas de transmisión y recepción de señales sin la necesidad de utilizar equipos costosos o especializados [1].

La aplicación del SDR en la educación tiene muchas ventajas: se pueden simular numerosos escenarios y se pueden analizar señales en diferentes bandas de frecuencia; sin embargo, a pesar de todo este potencial prometido, ciertamente hemos presenciado una gran brecha entre el aprendizaje teórico y su práctica en la vida real en una gran cantidad de instituciones educativas, especialmente en el campo de las telecomunicaciones. Los estudiantes reciben formación sobre los principios de modulación, transmisión y recepción de señales, pero rara vez, o nunca, tienen la oportunidad de embarcarse en la experimentación directa de este concepto en un entorno de laboratorio. Esta falta de experimentación tiende a obstaculizar su comprensión plena de la naturaleza de los problemas que plantean los sistemas de comunicaciones de ámbito relevante y también inhibe su propio desarrollo de las habilidades técnicas que son vitales para su futuro desempeño profesional [2].

La Universidad Estatal Península de Santa Elena cuenta con una Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, cuyo objetivo es mejorar la calidad de la formación práctica de los estudiantes, los laboratorios existentes, por ejemplo, incluyen la práctica en áreas clave como redes y antenas, pero tienen restricciones que se limitan para un cambio rápido en la industria. Por ello, surge la necesidad de modernizar las instalaciones. La incorporación HackRF One y el software SDRAngel es una gran ventaja. Gracias a estos dispositivos, los estudiantes no solo aprenderán sobre modulaciones avanzadas como NFM, AM y QPSK, sino que también las practicarán. Esto también hará que las prácticas sean más activas y efectivas, ayudando a llenar la brecha entre el conocimiento teórico obtenido en las clases y la tecnología práctica después de las clases. No hay duda de que la mejora de estos laboratorios mejorará significativamente su formación.

HackRF One es un SDR famoso por su transmisión y recepción de señales de amplia frecuencia, mientras que SDRAngel denota un software que trabaja con el hardware anterior para la simulación y análisis de las diferentes modulaciones [3]. Al trabajar en conjunto, estos instrumentos proporcionan un entorno de trabajo eficaz que simula sistemas de comunicación reales, lo que permite a los estudiantes aprender de una manera más entusiasta y práctica. El propósito del proyecto es utilizarlos para desarrollar prácticas de laboratorio que no solo fortalezcan la comprensión teórica, sino que también brinden una visión práctica de los problemas y las soluciones tecnológicas que aparecen en el campo de las telecomunicaciones.

La selección de modulaciones NFM, AM y QPSK no es aleatoria; estas representan un espectro suficiente de aplicaciones en telecomunicaciones, desde transmisión de audio de banda sorprendentemente estrecha hasta transmisión de video digital de banda casi ancha. NFM es un medio para comunicaciones de voz de alta fidelidad, como las que se usan en radios de emergencia y comunicaciones de radio comerciales [4]. El otro tipo de modulación am, conocida ampliamente por su uso en la transmisión de audio comercial, puede transmitir señales analógicas, lo que la convierte en una técnica de modulación fundamental en telecomunicaciones. DATV permite la incorporación de la modulación QPSK, lo que indica los primeros pasos en la evolución hacia sistemas de transmisión digital y permite la interacción de los estudiantes con tecnologías avanzadas que reflejan las tendencias actuales del mercado [5].

Además, este proyecto tiene una dimensión educativa, ya que uno de los objetivos principales es preparar un conjunto de instrucciones documentadas que puedan ayudar a los futuros estudiantes a comprender y realizar estas prácticas. Con el objetivo de mejorar la cultura de aprendizaje a nivel de facultad, los recursos proporcionados serán exhaustivos debido al registro minucioso de cada aspecto de todo el proceso, incluyendo la puesta en marcha del proyecto experimental y el análisis de los resultados obtenidos, de esta manera se reduce el abismo que a menudo existe entre el aprendizaje en el aula y la utilidad real de los conocimientos adquiridos, y los estudiantes son capaces de abordar los problemas técnicos que probablemente se les presenten a lo largo de su carrera profesional.

1.1.1. Identificación del problema

Se considera que existe una discrepancia considerable entre lo que se enseña en teoría y lo que hacen en la práctica los profesionales no especializados en comunicaciones en lo que respecta a los estudios de telecomunicaciones. Con respecto a la teoría básica de modulación y transmisión de señales, los estudiantes pueden comprender los principios a simple vista, pero son incapaces de realizar operaciones básicas debido a la falta de habilidades adquiridas en un entorno práctico donde pondrían en práctica lo aprendido en el curso; como resultado, se abordan cuestiones técnicas más complejas, como mejorar la calidad de las señales, controlar interferencias, etc., se produce una brecha entre las expectativas de los empleadores y el desempeño de los graduados.

Además, debido a la disponibilidad limitada de tecnologías avanzadas necesarias para las tendencias en ascenso en el campo de las telecomunicaciones, como los sistemas de radio definidos por software (SDR), muy pocos estudiantes pueden capacitarse para adaptarse a tales necesidades. A medida que aumenta la importancia de las comunicaciones digitales, como la televisión digital amateur, la capacitación en configuraciones prácticas debe mantenerse actualizada. Si no se está lo suficientemente capacitado en estas tecnologías, no se estará en línea con un mercado laboral competitivo, en el que se valora mucho la capacidad de operar equipos avanzados y resolver problemas técnicos. Esto plantea una necesidad urgente de introducir prácticas de laboratorio empleando la tecnología SDR, constituyendo un nexo entre la teoría y la práctica. De esta manera, los estudiantes se formarían no sólo para comprender los fundamentos técnicos, sino también para adquirir la convicción necesaria para afrontar los retos tecnológicos que se avecinan, como los que se experimentan en el ámbito laboral, debido a las condiciones industriales en constante evolución.

1.1.2. Justificación

La decisión de realizar una pasantía en HackRF One y SDRAngel surge de la necesidad de ofrecer una exposición práctica real en la práctica de tecnologías avanzadas como la radio definida por software. Estas tecnologías son el presente y el futuro de las comunicaciones, proporcionando una versatilidad extrema en la manipulación y transmisión de señales. Con especial referencia a la elección realizada en relación con modulaciones como NFM (modulación de frecuencia estrecha), AM (modulación de amplitud) y QPSK (modulación por desplazamiento de fase), estos estudiantes tienen la oportunidad de participar en estudios de componentes muy útiles de las telecomunicaciones.

Los sistemas de comunicación de audio aplican la modulación NFM debido a su uso efectivo del ancho de banda y la resistencia al ruido externo, de ahí la necesidad de comprender este concepto en los sistemas de transmisión de audio, por otro lado, la modulación AM es una técnica de modulación más antigua pero bien conocida en telecomunicaciones, a un nivel de mayor difusión, esta es una banda preferida para la modulación de frecuencia de voz más la modulación de amplitud de banda lateral única, que es útil para investigar los efectos de la transmisión en todas las bandas laterales y la portadora, la transmisión de DATV o televisión digital vía radioafición dotará, sin embargo, a los alumnos de conocimientos sobre las tecnologías de transmisión más recientes, siendo plenamente conscientes del modo actual de comunicación que es el digital; en este tipo de tecnología se utilizará la modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), un esquema de modulación eficiente que permite la transmisión de señales de televisión digital con alta calidad y robustez, incluso en condiciones de baja potencia o interferencias, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones de radioafición.

Estas prácticas ofrecen a los estudiantes la oportunidad de aplicar la teoría de modulación y transmisión de señales a la práctica, pero también les enseñan valiosas habilidades técnicas necesarias para el desarrollo de su carrera, estas prácticas los preparan para los rigores prácticos de la configuración, el ajuste de parámetros y el desmontaje de equipos, donde aprenden cómo estas variables afectan el rendimiento y la transmisión de la señal; además, estos sistemas permiten la creatividad y la experimentación en los estudiantes en la medida en que mezclan y combinan y desarrollan soluciones a problemas complejos como la conexión, la claridad de la señal y el funcionamiento conjunto de los dispositivos. La definición de teoría puede complementarse con esta adquisición de habilidades, ya que mejora sus posibilidades de superar problemas muy comunes y prácticos en la industria y que requieren altos niveles de tecnología.

1.1.3. Alcances

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar prácticas de laboratorio basadas en prácticas con tecnología SDR (Software Defined Radio), donde los estudiantes aprendan a enviar y recibir sonido y video a través de HackRF One y SDRAngel; en el proyecto se realizarán tres tipos de modulación: Modulación de Frecuencia de Banda Estrecha (NFM), Modulación de Amplitud (AM) y Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK) utilizando tecnología de televisión digital amateur (DATV); estas prácticas ayudarán a los estudiantes a tener más experiencia práctica sobre aspectos teóricos mediante la realización de configuraciones y optimización de señales de radiofrecuencia (RF).

Adicionalmente, se elaborarán unos manuales, en los que se presentará en detalle cada paso de la práctica, así como los preparativos para su incorporación en la reproducción en papel. Asimismo, se fundamentarán y darán sentido a los resultados que se alcancen, lo que también ayudará a mejorar y modificar las prácticas en cuanto a los parámetros técnicos mejorados, como la eficiencia de la señal y la transmisión. Al final del ciclo del proyecto, los graduados podrán implementar tecnologías SDR y estarán listos para abordar cualquier desafío tecnológico en el dominio de las telecomunicaciones.

1.2. Revisión bibliográfica

1.2.1. Radio Definida Por Software

El HackRF One es uno de los dispositivos SDR más populares del mercado. El término SDR significa "Software Defined Radio" y se utiliza para agregar sistemas de comunicación por radio que implementan en software en lugar de hardware los componentes encargados de modular y demodular las señales de radio. La idea es tener un dispositivo que sea capaz de recibir y transmitir diferentes protocolos de radio con solo configurar su software [6].

La tecnología SDR tiene una amplia gama de aplicaciones, entre las que se incluyen: comunicaciones móviles, aplicaciones militares, investigación y desarrollo, monitoreo del espectro, radioafición [6].

El funcionamiento de un SDR implica varios componentes clave [7]:

Front-End de RF, este componente captura señales de radiofrecuencia y las convierte en un formato adecuado para su procesamiento. Generalmente incluye amplificadores y filtros para mejorar la calidad de la señal.

Convertidor analógico-digital (ADC), las señales de Radio Frecuencia son digitalizadas por el ADC, lo que permite que los algoritmos de software las procesen, este paso es importante porque transforma las señales analógicas en datos digitales que pueden ser manipuladas.

Procesamiento de señales digitales (DSP), el software que se ejecuta en procesadores de uso general o hardware especializado hace la modulación, demodulación, filtrado y entre muchas más tareas de procesamiento de señales, esta flexibilidad permite que los SDR se acomoden a varios tipos de señales y protocolos.

Software de interfaz de usuario: los usuarios interactúan con los sistemas SDR a través de un software que visualiza las señales, permite realizar ajustes en tiempo real y proporciona herramientas para el análisis y la decodificación de señales.

Algunas de las ventajas de los SDR son las siguientes:

Flexibilidad, los SDR se pueden reconfigurar sobre la marcha para adaptarse a nuevos estándares o protocolos sin cambios de hardware [8].

Rentabilidad, reducen la necesidad de múltiples dispositivos de hardware al consolidar funcionalidades en una única plataforma [9].

Capacidad de actualización, se pueden agregar nuevas funciones a través de actualizaciones de software, lo que permite una mejora continua de las capacidades sin modificaciones físicas [9].

Algunas características de varios ejemplos de hardware SDR son mostradas en la Tabla 1:

Tabla 1. Características generales de tipos de SDR más comunes

| Característica | HackRF One | RTL-SDR |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|
| Precio | Aproximadamente \$300 USD | Aproximadamente \$30 USD |
| Rango de frecuencia | 1 MHz – 6 GHz | 500 KHz – 1.75 GHz |

| | | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Modos de funcionamiento | Half-duplex | Solo recepción |
| Ancho de banda máximo | Hasta 20 MHz | Hasta 3.2 MHz |
| Soporte de modulación | AM, APT, FM, DSB, FM, NTSC, SSB, VOR, 802.15.4, AIS, ADS-B, APRS, DAB, DCF77, DMR, D-Star, DVB-S, DVB-S2, FreeDV, LoRa, M17 | AM, FM, NFM, SSB, y algunas otras según software |
| Precisión de frecuencia | Alta, gracias a la opción de usar un reloj externo GPSDO | Moderada (sin opción nativa de reloj externo) |

1.2.2. Modulaciones analógicas y digitales

A continuación, se muestran los principales tipos de modulación compatibles con esta configuración:

1.2.2.1. AM (Amplitude Modulation - Modulación en Amplitud)

AM es la amplitud de la señal portadora la que cambia, representando la información de la señal de entrada [10].

En SDRAngel se pueden configurar diferentes variantes de modulación AM para adaptarse a distintos tipos de señales y aplicaciones, véase la Ilustración 1:

- **AM estándar (AM):** para transmitir o recibir señales de radiodifusión AM o de estaciones de radio antiguas, el ancho de banda es ajustable en el programa, lo que te permite sintonizar señales AM de manera precisa [10].
- **DSB (Double Sideband - Doble Banda Lateral):** ambas bandas laterales se modulan y transmiten junto con la portadora, esta es usada en aplicaciones de radiocomunicación, aunque ha sido reemplazada en muchas áreas por la SSB (Single Sideband) [11].
- **SSB (Single Sideband - Banda Lateral Única):** se puede elegir entre **USB (Upper Sideband - Banda lateral superior)** y **LSB (Lower Sideband - Banda lateral inferior)**, dependiendo de cuál banda lateral se desea utilizar. La señal se transmite en una banda lateral específica, lo que reduce el uso del espectro, esta es muy utilizada en comunicaciones de radioaficionados y radiocomunicaciones de larga distancia, ya que ahorra ancho de banda y potencia [11].

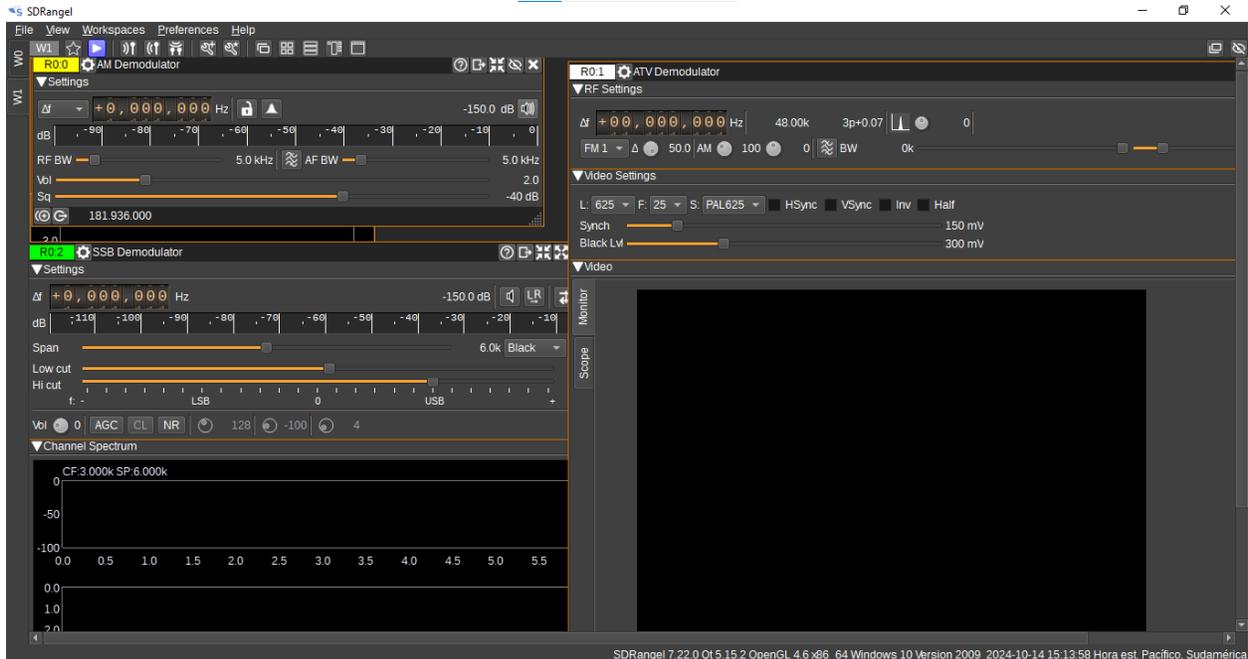


Ilustración 1. Interfaces de modulaciones AM de recepción en SDRangel.

Fuente: autor

1.2.2.2. FM (Frequency Modulation - Modulación de Frecuencia)

La amplitud de la portadora se mantiene constante, mientras que la frecuencia se desplaza hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la amplitud de la señal moduladora. Esto permite que FM tenga una buena inmunidad al ruido y una alta calidad de audio [12].

Dentro de SDRangel, es posible elegir distintas variantes de modulación FM según el ancho de banda y el tipo de señal que se desea transmitir o recibir, tal y como se enseña en la Ilustración 2, como lo son:

- NFM (Narrowband FM - Modulación de Frecuencia en Banda Estrecha)**
 Es utilizada en aplicaciones donde el espectro de frecuencias es limitado y se necesita un uso eficiente, como en comunicaciones de voz en radios de dos vías (walkie-talkies, radios de banda ciudadana, etc.). Su ancho de banda es pequeño, generalmente entre 5 kHz y 12.5 kHz [12].
- WFM (Wideband FM - Modulación de Frecuencia en Banda Ancha)**
 Común en la transmisión y recepción de audio de alta calidad, como la radio FM comercial (transmisión de estaciones de música o noticias). El ancho de banda es grande, generalmente alrededor de 200 kHz [12].

- **FM estándar (FM)**

Puede representar una FM de ancho intermedio, utilizada para aplicaciones que no requieren ni un ancho tan reducido como NFM ni tan amplio como WFM. Usada en sistemas de comunicaciones de mayor calidad, como algunas transmisiones de datos o en sistemas de entretenimiento.

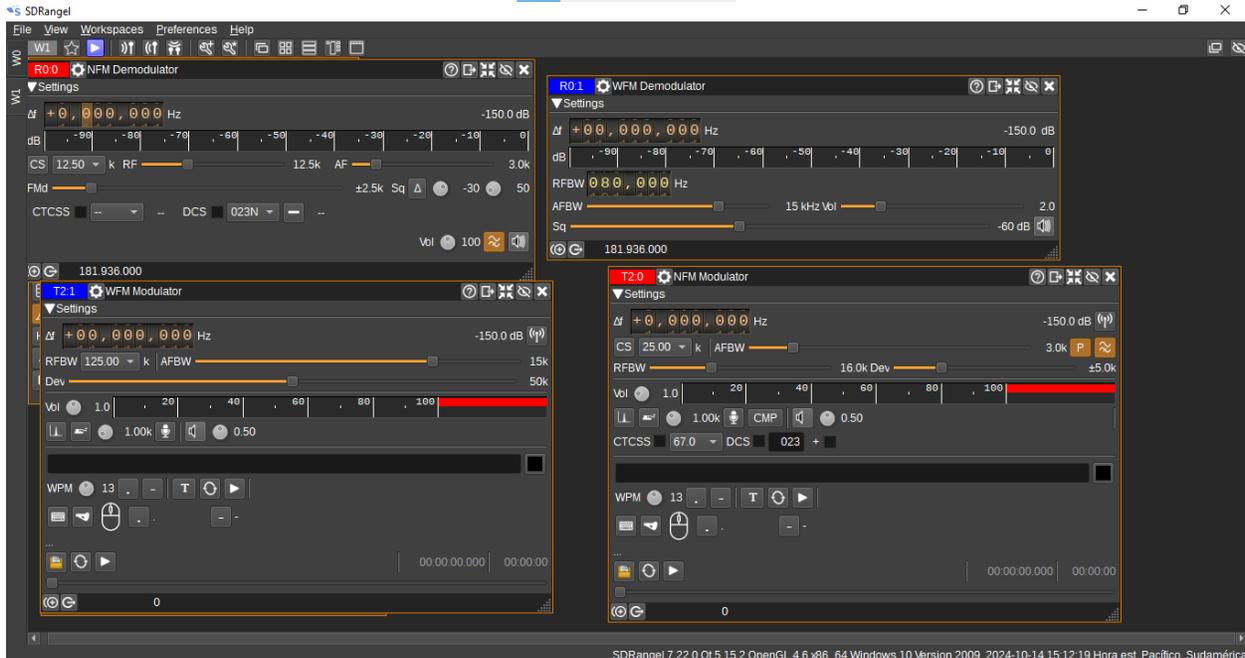


Ilustración 2. Interfaces de modulaciones FM, tanto de transmisión como recepción, en SDRangel.

Fuente: autor

1.2.2.3. Modulaciones digitales

Son técnicas utilizadas para transmitir datos de forma digital por medio de la modulación de una señal portadora, son representados por datos binarios (0s y 1s).

Las modulaciones digitales que se pueden manejar dentro de SDRangel se pueden apreciar en la Ilustración 3, y se las nombra a continuación:

- **FSK (Frequency Shift Keying - Modulación por desplazamiento de frecuencia)**
Se utilizan dos (o más) frecuencias diferentes para representar los valores binarios. Por ejemplo, una frecuencia puede representar un "1" y otra puede representar un "0". Usado en aplicaciones como modems y sistemas de radioaficionados. Es resistente al ruido y puede ser utilizado en condiciones de señal pobre.
- **PSK (Phase Shift Keying - Modulación por desplazamiento de fase)**

Modula la fase de la portadora para representar los datos. Por ejemplo, un cambio de fase de 0° puede representar un "0", mientras que un cambio a 180° puede representar un "1". Existen variantes como BPSK (Binary PSK), QPSK (Quadrature PSK) y 8-PSK que representan más de un bit por símbolo. Ampliamente utilizado en comunicaciones digitales, incluidos sistemas de satélites, Wi-Fi, y redes móviles [11].

- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation - Modulación de amplitud en cuadratura)**

QAM adopta cambios en la amplitud y la fase de la portadora para transmitir múltiples bits de datos en un solo símbolo, por ejemplo, 16-QAM puede representar 4 bits por símbolo, es muy utilizado en transmisión de datos de alta velocidad, como en modems de cable, Wi-Fi, y transmisión de televisión digital.

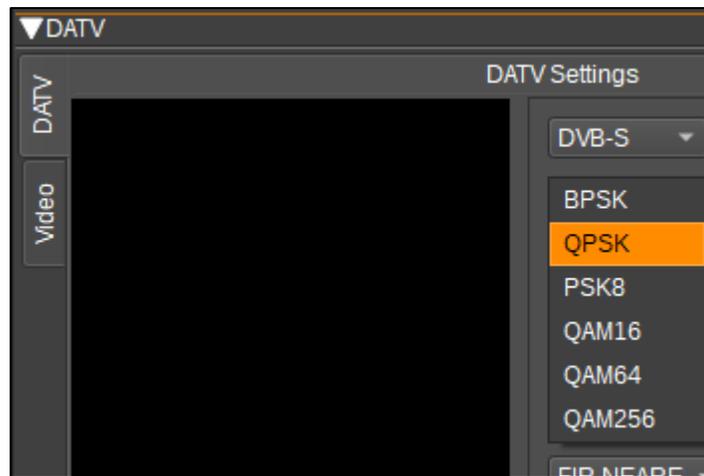


Ilustración 3. Modulaciones digitales en SDRAngel, en demodulador DATV.

Fuente: autor

1.2.3. Modulación De Frecuencia De Banda Estrecha (NFM)

La modulación de frecuencia de banda estrecha (Narrowband Frequency Modulation - NFM) es una modalidad de modulación de frecuencia que emplea una banda de ancho reducido en contraste con la modulación de frecuencia de banda ancha convencional (Wideband Frequency Modulation - WFM). Se utiliza frecuentemente en las comunicaciones radiofónicas bidireccionales, especialmente en las bandas VHF (Very High Frequency) (30 MHz a 300 MHz) y UHF (Ultra High Frequency) (300 MHz a 3 GHz), donde es esencial utilizar de manera apropiada el espectro disponible [13]. Los rangos de frecuencia que los radioaficionados suelen utilizar son: 144-146 MHz y 430-440 MHz. [14].

El NFM ocupa normalmente un ancho de banda de unos 11 kHz con un espaciado entre canales de 12,5 kHz, el ancho de banda más estrecho permite que quepan más canales dentro del mismo

rango de frecuencia, lo que lo hace ideal para entornos de comunicación abarrotados. La desviación de frecuencia se establece generalmente en aproximadamente 2,5 kHz, que es la mitad de la desviación de la FM estándar (que tiene una desviación de aproximadamente 5 kHz). Esta desviación reducida da como resultado menores requisitos de potencia de señal y ayuda a mantener la claridad en la comunicación en distancias más cortas [13]. Se pueden acomodar más canales dentro del mismo espectro de frecuencia debido al ancho de banda más estrecho; el ancho de banda limitado ayuda a minimizar la interferencia de los canales adyacentes.

Por otro lado, suele tener un alcance más corto en comparación con WFM debido a la menor relación señal-ruido (SNR). Esto significa que, si bien funciona bien para comunicaciones de corto alcance, puede tener dificultades en áreas periféricas donde las señales son más débiles, además la calidad del audio puede verse ligeramente comprometida ya que el índice de modulación es menor, lo que afecta la claridad de las transmisiones de voz [15].

“En condiciones ideales con línea de visión (por ejemplo, utilizando frecuencias VHF), la NFM puede alcanzar alcances de hasta 10 a 20 millas (16 a 32 km) con radios portátiles [16], pero usando SDR como el HackRF One y el software SDRAngel para transmitir en NFM bajo condiciones ideales (terreno despejado, buena antena y condiciones atmosféricas favorables), la distancia de comunicación podría estimarse en alrededor de 1 a 5 millas (1.6 a 4 km). Esto se debe principalmente a las limitaciones de potencia y a la configuración de half-duplex del HackRF One, que no permite recibir y transmitir simultáneamente y limita su alcance en comparación con radios de mayor potencia.”

1.2.4. Modulación de Amplitud (AM)

Esta técnica de transmisión emplea la modulación, mediante la cual la amplitud de una señal portadora de alta frecuencia varía de acuerdo con la amplitud de una señal de información de frecuencia más baja (como una señal de audio o de vídeo). Este método permite transmitir la información contenida en la señal moduladora a una frecuencia más alta que, de hecho, podría transmitirse a grandes distancias. Solo cambia la amplitud, por lo que las desviaciones de frecuencia y fase de una función de onda sinusoidal portadora permanecen invariables. [17].

Mecanismo de modulación de amplitud:

- Onda portadora: una onda continua que aunque no transporta información por sí misma, sirve para la modulación de una manera básica.
- Señal moduladora: señal de información (audio, vídeo, etc.) que modifica la amplitud de la onda portadora.
- Forma de onda resultante: la señal modulada en amplitud consta de la onda portadora junto con dos bandas laterales, que son componentes de frecuencia que transportan la información real [17].

En condiciones normales, la transmisión AM desperdicia la mayor parte de la energía en la parte portadora de la señal, que no transporta información, mientras que las bandas laterales sí la transportan. Por lo tanto, la modulación AM se destaca por ser más ineficiente en términos de consumo de energía. Para cualquier señal AM, el ancho de banda requerido es el doble de la frecuencia de modulación esperada. Por ejemplo, si la señal de información tiene una frecuencia pico de 5 kHz, el ancho de banda de la señal AM es de 10 kHz. La modulación AM se usa ampliamente en la radiodifusión de onda media (AM en la radio comercial), en la televisión analógica (como la transmisión de señales de video AM-VSB) y también para comunicaciones de emergencia. [18].

1.2.5. Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK)

Se emplea una técnica de modulación digital en la que la fase de la portadora se modula en uno de cuatro estados para transmitir los datos. Por lo tanto, QPSK transmite dos bits de información por cada desplazamiento de fase (símbolo), lo que mejora la eficiencia del ancho de banda en comparación con los esquemas de modulación que transmiten un bit por símbolo, como BPSK [19].

Las cuatro fases utilizadas por QPSK (0° , 90° , 180° , 270°) transmiten una combinación de dos bits como se indica en el Diagrama de Constelación de la Figura 4. Por lo tanto, en lugar de simbolizar un solo bit, QPSK transmite dos bits por símbolo, duplicando en efecto la eficiencia del uso del espectro[20]:

- **00:** Fase de 0° (o 0 radianes)
- **01:** Fase de 90° (o $\frac{\pi}{2}$ radianes)
- **11:** Fase de 180° (o π radianes)
- **10:** Fase de 270° (o $\frac{3\pi}{2}$ radianes)

QPSK transmite dos bits por símbolo, utiliza la mitad del ancho de banda que necesitaría una modulación para transmitir la misma cantidad de datos. Esto lo hace muy adecuado para aplicaciones donde el espectro es limitado o costoso, esta modulación es más eficiente en ancho de banda. La tasa de error de bit es más eficiente en el uso del espectro, se puede transmitir más información en el mismo ancho de banda, lo que es ventajoso en comunicaciones de alta capacidad [19].

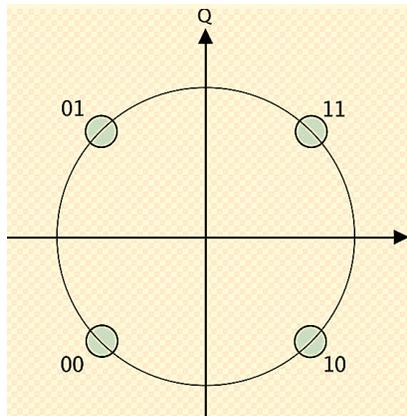


Ilustración 4. Diagrama de constelación de modulación QPSK.

Fuente: [21]

1.2.6. Código Morse

El carácter se codifica en secuencias de señales cortas y largas que se conocen como puntos y rayas. Por lo tanto, el sistema se presta a la transmisión a través de una variedad de medios, como señales eléctricas, ondas de radio e incluso luz visible[22].

El código Morse especifica letras, números mediante la combinación de puntos y rayas:

Un punto (.) es una señal corta.

Por otro lado, las rayas (-)se transmiten como una señal larga, mucho más larga que el punto, aproximadamente tres veces.

Aparte de las diferencias de transmisión, no se debe seguir nada más aquí:

- Un espacio igual a la longitud de un punto separa elementos distintos dentro del carácter.
- Una letra se indica con un espacio igual a tres puntos.
- Un espacio igual a siete puntos separa palabras.

La transmisión comenzó con los relés más primitivos; la transmisión se hizo deliberadamente para no distorsionar la señal; las ondas de radio aún no podían mantenerse debido a la interferencia; y además, donde había ruido, los operadores podían separar la señal de las señales. Es decir, la ausencia era ruido y la presencia era señal [22].

1.2.7. Parámetros generales de simulación

- **Frecuencia portadora**

Se refiere a la frecuencia específica de cualquier onda portadora; la onda portadora es una onda sinusoidal que se utiliza para la transmisión de información. Esto facilita las

señales de modulación, permitiendo así la transmisión de información a larga distancia. Se permiten velocidades de transmisión de datos más altas y una corrección de errores más efectiva con frecuencias portadoras más altas, importantes para sistemas como GPS y telecomunicaciones. La frecuencia portadora debe ser generalmente más alta que el componente de frecuencia más alto de la señal moduladora para evitar problemas como aliasing y distorsión [23].

- **Potencia de transmisión**

Es la cantidad de potencia que utiliza un transmisor para enviar señales a través de un medio de comunicación. Los niveles de potencia variables determinarán la distancia, así como la calidad de la señal transmitida. Una potencia de transmisión alta puede garantizar que una señal se reciba bien a largas distancias, pero una potencia de transmisión más alta da como resultado un mayor consumo de energía, lo que también causa altos niveles de interferencia a otras señales. Si bien equilibrar la intensidad de la señal adecuada para una recepción sin interferencias es una cuestión central en el diseño de sistemas de comunicación [24].

- **Ganancia**

Se refiere al aumento de potencia o amplitud de una señal a medida que pasa a través de un amplificador o una antena. Por lo general se expresa en decibeles (dB) e indica cuánto más fuerte es la señal de salida en comparación con la señal de entrada. La ganancia puede mejorar la claridad y la fuerza de la señal, mejorando la calidad general de la comunicación. En los sistemas de antena, la ganancia ayuda a enfocar las ondas de radio en direcciones específicas, lo que aumenta el alcance de transmisión efectivo y la calidad de recepción [23].

- **Ancho de banda**

Es el rango de frecuencia de las señales que se van a transmitir de una frecuencia designada a otra; designado para y necesita un mayor rendimiento; el flujo de datos es una nomenclatura ambigua; un espectro de alta frecuencia que permite transmitir información a través de un canal necesita modulación de señal. Por lo tanto, para la transmisión de vídeo o aplicaciones de Internet de alta velocidad, cuanto mayor sea el valor de Bandwidth (banda ancha), mayor será su relevancia: La unidad de medida del ancho de banda será Hertz. Generalmente, el ancho de banda se refiere a la capacidad bruta de los canales de comunicación [24].

- **Tasa de muestreo**

Indica el número de veces que se analiza la muestra por segundo, en función de la muestra con una frecuencia expresada en la unidad hertz. La frecuencia de muestreo afecta así directamente a la fidelidad de la representación digital de la señal analógica. El teorema de Nyquist establece que, para reconstruir una señal analógica fielmente sin pérdida de información, la frecuencia de muestreo tiene que ser al menos el doble de la

frecuencia más alta presente en la señal. Este principio determina que, al digitalizar, los datos deben ser lo suficientemente amplios como para garantizar la recopilación de toda la información relativa a la señal original.

1.2.8. Televisión Digital Amateur (DATV)

Se trata de una forma de transmisión de televisión digital que practican los radioaficionados. Permite a los radioaficionados transmitir contenidos de programas audiovisuales en ondas de radio, lo que permite a sus usuarios crear y compartir contenidos de transmisión de vídeo como lo hacen los radiodifusores de televisión ordinarios. Está organizado de tal manera que la posibilidad de pérdida del espectro se optimiza para diferentes entornos de transmisión. La escasez de frecuencias en la operación de radioaficionados hace que sea imperativo garantizar este tipo de eficiencia [25].

Las configuraciones de DATV consisten principalmente en SDR y software de codificación especial capaz de crear señales DATV. El equipo varía desde transmisores simples hasta antenas equipadas capaces de realizar transmisiones de alta definición [26].

1.3. Descripción de herramientas y equipo utilizado

1.3.1. HackRF One

A pesar del costo, el HackRF One es una elección ideal para proyectos avanzados de radio definida por software (SDR) debido a su versatilidad y capacidades superiores en comparación con dispositivos, en la Ilustración 5 se muestra una imagen del dispositivo físico [27].

Son capaces de recibir señales de radio por medio de una antena, las cuales son procesadas internamente hasta convertirlas en datos digitales y analizarlas o expresarlas en un computador mediante software SDR como GNU Radio, SDR#, SDRAngel, etc. Estas señales pueden ser reproducidas desde la memoria o generadas mediante parámetros preestablecidos por el usuario como frecuencia o tipo de modulación, o pueden ser enviadas directamente. La utilidad de línea de comandos permite configurar estos parámetros mientras se transmite, facilitando la fácil personalización del proceso. Es un dispositivo versátil y destaca por su facilidad de uso [28]

Para transmitir, HackRF One puede reproducir señales grabadas o generar otras nuevas según parámetros definidos por el usuario. La utilidad de línea de comandos permite a los usuarios especificar la frecuencia y el tipo de modulación al enviar señales [29].

HackRF One se utiliza ampliamente en varios campos: investigación de seguridad, se ha empleado en demostraciones de vulnerabilidades como suplantación de GPS e interceptación de llaveros; radioafición, los entusiastas la utilizan para experimentar con diferentes frecuencias y técnicas de transmisión; fines educativos, su naturaleza de código abierto lo convierte en una excelente herramienta para aprender sobre comunicaciones por radio [30].

1.3.1.1. Especificaciones técnicas del dispositivo HackRF One

A continuación, se presentan a características del dispositivo, junto con algunas de las capacidades que le otorgan gran potencia y flexibilidad [28]:

- Tiene un rango de frecuencia de operación de 1 MHz a 6 GHz.
- Es un transceptor con la capacidad de operar en half-duplex.
- Es capaz de muestrear hasta 20 millones de muestras por segundo, hasta 21,5 depende del tipo de controlador USB 2.0 HS.
- Muestreo de las señales con 8 bits en cuadratura.
- Compatible con los programas SDR tanto para Windows como Linux, lo que incluye tanto SDR# como GNU Radio, SDRAngel, etc.
- Puede configurar los amplificadores de ganancia vía software, con 3 etapas dedicadas a recepción y 2 etapas para transmisión.
- Filtros de señal de banda base configurables por software con un ancho de banda de señal máximo de 28 MHz y un roll-off de 3 dB hasta 30 MHz.
- Alimentación al puerto de antena configurable por software con hasta 50 mA a 3,3 V.
- Conector de antena SMA hembra.
- Botones convenientemente configurados para configurar el dispositivo.
- Cabezales de pines internos para posible expansión de la placa mediante shields.
- Interfaz USB 2.0 de alta velocidad.
- Es una plataforma de hardware abierta.



Ilustración 5. Dispositivo SDR, HackRF One.

Fuente: autor

1.3.2. Software para SDR

El HackRF One es uno de los dispositivos SDR más populares del mercado. El término SDR significa "Software Defined Radio" y se utiliza para agregar sistemas de comunicación por radio que implementan en software en lugar de hardware los componentes encargados de modular y demodular las señales de radio. La idea es tener un dispositivo que sea capaz de recibir y transmitir diferentes protocolos de radio con solo configurar su software [31].

Entre las cosas que hacen que el HackRF One sea tan popular están su capacidad de recibir y transmitir radio en el rango de 1Mhz a 6GHz, su compatibilidad con software de código abierto como GNU-Radio, tener una comunidad notable, una documentación bien escrita y su precio "bajo". Cosas como tener un rango tan amplio de frecuencia de operación permite que este dispositivo se pueda usar con dispositivos emisores de RF que pueden ir desde llaveros (que suelen operar en el rango de frecuencia de 300-450Mhz) hasta cosas mucho más impresionantes como monitorear lanzamientos de cohetes de SpaceX [31].

Algunas características clave del software SDR incluyen: flexibilidad, la capacidad de reconfigurar el dispositivo para diferentes usos simplemente cambiando los parámetros en el software; interoperabilidad, permite que el hardware trabaje con múltiples estándares de comunicación y modulaciones; interfaz gráfica, los programas SDR cuentan con interfaces visuales que facilitan la interacción del usuario con el sistema y el ajuste de parámetros en tiempo real [9]; entre otras características claves son presentada a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2. Características generales de algunos tipos de software para SDR

| Características | SDRAngel | GNU Radio | GQRX |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Interfaz gráfica | Completa, amigable y en tiempo real | No cuenta con una GUI nativa; es modular y programable mediante bloques | GUI simple y ligera |
| Dificultad de uso | Uso medianamente fácil, sobre todo para principiantes | Alta complejidad; requiere conocimientos en programación | Fácil de usar, ideal para escuchar señales |
| Funcionalidad | Soporte para diversas modulaciones y visualización de espectro | Muy versátil, con capacidad para desarrollar sistemas complejos | Enfocado principalmente en la recepción de |

| | en tiempo real | procesamiento de señales | señales |
|-------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Modulación/Demodulación | Soporte nativo para diversas modulaciones de radio | Necesita programación manual de bloques para cada tipo de modulación | Principalmente orientado a recepción; no para transmisión |
| Extensibilidad | Extensible mediante Complementos | Altamente extensible mediante bloques personalizados | Limitada; pocas opciones de personalización |

1.3.2.1. SDRAngel

SDRAngel es un frontend analizador de señales y SDR Qt5 / OpenGL 3.0+ de código abierto para varios hardware.

La elección de SDRAngel se debe a que es mucho más accesible de usar a diferencia de las demás, ya que cuenta con una interfaz gráfica intuitiva y rica en funciones que permite la visualización en tiempo real de las señales y ajustes rápidos de los parámetros, es más directo y práctico, ideal para quienes buscan resultados inmediatos en transmisiones y recepciones [32].

SDRAngel utiliza complementos de origen de muestra para recopilar muestras de I/Q de un dispositivo de hardware. Luego, en la banda de paso devuelta, posiblemente decimado, se pueden utilizar uno o más complementos de recepción de canal para demodular, decodificar o analizar alguna parte de este espectro, utiliza complementos de recepción de muestras para enviar muestras de I/Q a un dispositivo de hardware. Se pueden utilizar uno o más complementos de transmisión de canal para producir muestras moduladas que se mezclan en una banda de paso de transmisión con posible interpolación posterior antes de enviarlas al dispositivo [32].

La interfaz de usuario está organizada en espacios de trabajo dentro de los cuales se colocan los diferentes componentes de la interfaz de usuario: dispositivo, espectro principal, canales, funciones. Estas interfaces de usuario se pueden redimensionar y mover libremente para permitirle componer la interfaz de usuario global a su conveniencia, se enseñan varios ejemplos en la Ilustración 6. Puede tener múltiples espacios de trabajo y mover componentes entre ellos. De manera predeterminada, los espacios de trabajo se apilan uno sobre otro y se pueden cambiar utilizando las pestañas laterales para que aparezca el espacio de trabajo seleccionado en la parte superior de la pantalla. Los espacios de trabajo se colocan en un área de acoplamiento y, por lo

tanto, se pueden acoplar para moverlos a otra pantalla en una configuración de múltiples pantallas [32].

Un elemento presente en SDRAngel es la gestión de modo exclusivo, que está diseñada para garantizar que una aplicación utilice solo un único dispositivo SDR, probablemente un HackRF One, sin permitir que ningún otro programa o aplicación tome el control del dispositivo. En algunas situaciones en las que el dispositivo SDR cuyo uso se requiere debe limitarse a una sola aplicación, esto puede ser muy útil, ya que evita que todo el mundo y todo lo demás acceda a él, excepto esa aplicación en particular [32].

Modulaciones posibles en SDRAngel [33]:

Análogica: AM, APT, Broadcast FM, DSB, FM, ILS, NTSC, PAL, SSB, VOR
Digital: 802.15.4, AIS, ADS-B, APRS, DAB, DAB+, DCF77, DSC, DMR, dPMR, D-Star, DVB-S, DVB-S2, End-of-Train, FreeDV, FT8, JYJ, LoRa, M17, MSF, Navtex, Packet (AX.25), Pager (POCSAG), RS41 Radiosonde, RTTY, TDF, WWVB

Hardware soportable [33]:

Airspy, Airspy HF, Airspy Discovery, BladeRF, Fun Cube, HackRF, Kiwi SDR, LimeSDR, LimeSDR Mini, Lime RFE, Perseus, PlutoSDR, RTL SDR, SDRplay RSP1, RSP1A, RSP2, RSPduo, RSPdx, SPECTRAN V6, USRP B210, XTRX

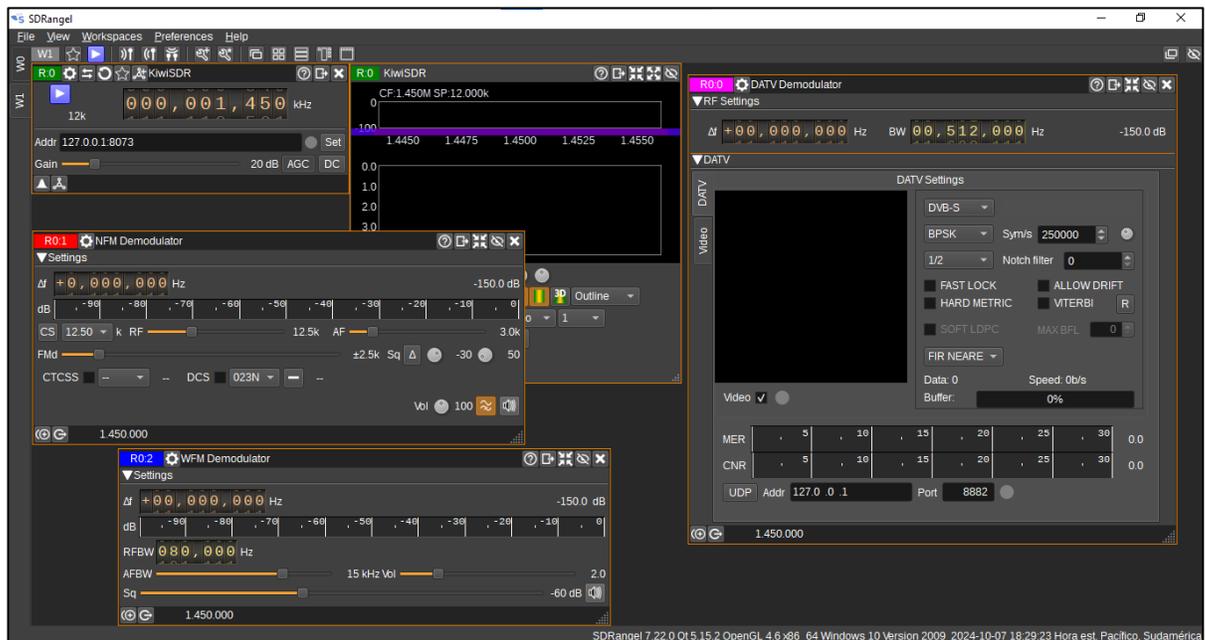


Ilustración 6. Complementos de SDRAngel.

Fuente: autor

1.3.2.2. Requisitos de Hardware

SDRAngel es una aplicación casi en tiempo real que exige potencia de CPU y velocidades de reloj para una latencia baja. Se recomienda una CPU de clase Core i7 reciente (2015 o posterior) preferiblemente con 4 núcleos de CPU HT (8 CPU lógicas o más) con un reloj nominal de más de 2 GHz y al menos 8 GB de RAM. Los procesadores Intel modernos incluirán una GPU adecuada para un soporte OpenGL adecuado. Por otro lado, SDRAngel no es tan exigente como los juegos de computadora recientes en cuanto a gráficos y los gráficos integrados en la CPU funcionan perfectamente. Los puertos USB-3 también son preferibles para una comunicación USB de alta velocidad y baja latencia. Puede ejecutarse en SBC potentes y se probó con éxito en un Udo Ultra.

Si aún no tiene instalado el entorno de ejecución de Visual C++, tendrá que instalar el entorno de ejecución de Visual C++ `vc_redist.x64.exe` desde Microsoft.

1.3.2.3. Proceso de instalación de software SDRAngel

En primer lugar, se requiere de la descarga del programa, se dirige a una página de GitHub, la cual es proporcionada directamente por el creador del software, el enlace es el siguiente: <https://github.com/f4exb/SDRAngel/releases>

Luego, debe bajar hasta llegar a la **versión 7.22.0**, desglose la sección llamada ‘Assets’, allí encontrará varios enlaces de descarga, escoja la opción que se adapte a su ordenador, en este caso se escoge el **.exe** (para Windows) tal y como se muestra en la Ilustración 7.

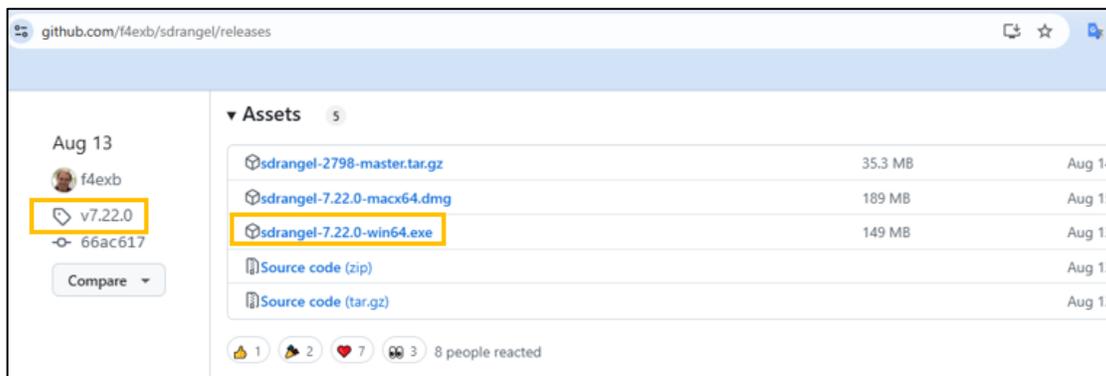


Ilustración 7. Enlace de descarga de SDRAngel.

Fuente: autor

Ahora, se dirige a la ubicación del archivo descargado y le da *doble clic* para empezar la instalación, puede guiarse de los siguientes pasos y la Ilustración 8:

Paso 1: Bienvenida, acción: SIGUIENTE

Paso 2: Acuerdo de licencia, acción: ACEPTAR

Paso 3: Opciones de instalación, acción: NO AGREGUE SDRANGEL AL PARCHE DEL SISTEMA (opción 1)

Paso 4: Lugar de ubicación, acción: SIGUIENTE (es recomendable no cambiar de ubicación de la instalación)

Paso 5: Carpeta de menú de inicio, acción: INSTALAR (es recomendable no cambiar de ubicación de la instalación)

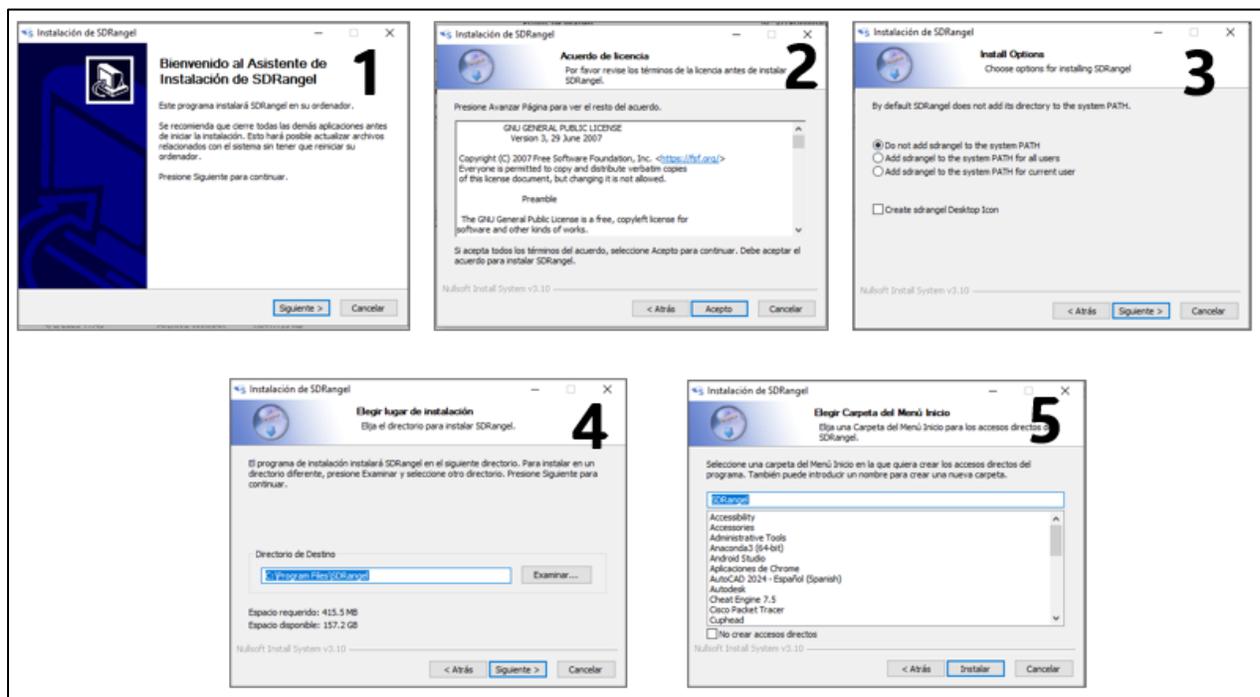


Ilustración 8. Proceso de instalación de SDRangel.

Fuente: autor

1.3.2.4. DATV en SDRangel

Cuando se trata de televisión digital amateur (DATV) y que implica la utilización de radio definida por software (SDR), es decir, una combinación de hardware y software que permite a los operadores de radioaficionados transmitir y recibir señales de vídeo digitales [25].

Por medio del HackRF One y SDRangel, se pueden utilizar diversas modulaciones para la DATV, que son fundamentales para transmitir señales de video en alta calidad a través de la

radio. Cada una de estas modulaciones tiene diferentes características en cuanto a eficiencia espectral, robustez frente al ruido y complejidad, en la Ilustración 9 se presentan las interfaces de este complemento, tanto de recepción como de transmisión.

A continuación, se presentan las modulaciones que pueden ser utilizadas para DATV en SDRAngel:

- **BPSK** (Binary Phase Shift Keying- Modulación por desplazamiento de fase binaria), es la forma más simple de modulación por cambio de fase. En BPSK, la fase de la portadora cambia entre dos posibles valores (0° y 180°), representando un bit por cada símbolo transmitido. Es una de las modulaciones más robustas frente al ruido y las interferencias, pero su eficiencia espectral es menor comparada con otras modulaciones.
- **QPSK**, es una de las modulaciones más comunes dentro de DATV que ofrece un eficiencia espectral y robustez frente al ruido, lo que la hace adecuada para la transmisión de señales de televisión digital amateur.
- **PSK8** (8-Phase Shift Keying - Modulación por desplazamiento de 8 fases), es una modulación que utiliza ocho estados de fase diferentes para transmitir tres bits por símbolo, es una versión más avanzada de la modulación PSK, esta aumenta la tasa de datos sin requerir más ancho de banda, pero a costa de una mayor sensibilidad al ruido y las interferencias.
- **QAM16**, es una modulación de amplitud en cuadratura que transmite 4 bits por símbolo; tiene una mayor eficiencia espectral mayor porque puede transmitir más información por cada símbolo, lo malo es que es más susceptible a interferencias y ruido.
- **QAM64**, mismo principio que 16-QAM, pero con más niveles de amplitud, lo que permite transmitir más bits por símbolo (6 bits respectivamente), son ideales en situaciones donde hay un buen margen de señal a ruido, y se quiere maximizar la tasa de transmisión de datos.
- **QAM256**, es una de las modulaciones de orden más alto disponibles para DATV; cada símbolo transmite 8 bits (256 posibles combinaciones de fase y amplitud), esto la hace extremadamente eficiente en términos de tasa de transmisión de datos, pero también es muy vulnerable al ruido e interferencias, esta modulación se usa en canales de alta calidad donde se requiere de una señal fuerte y clara.

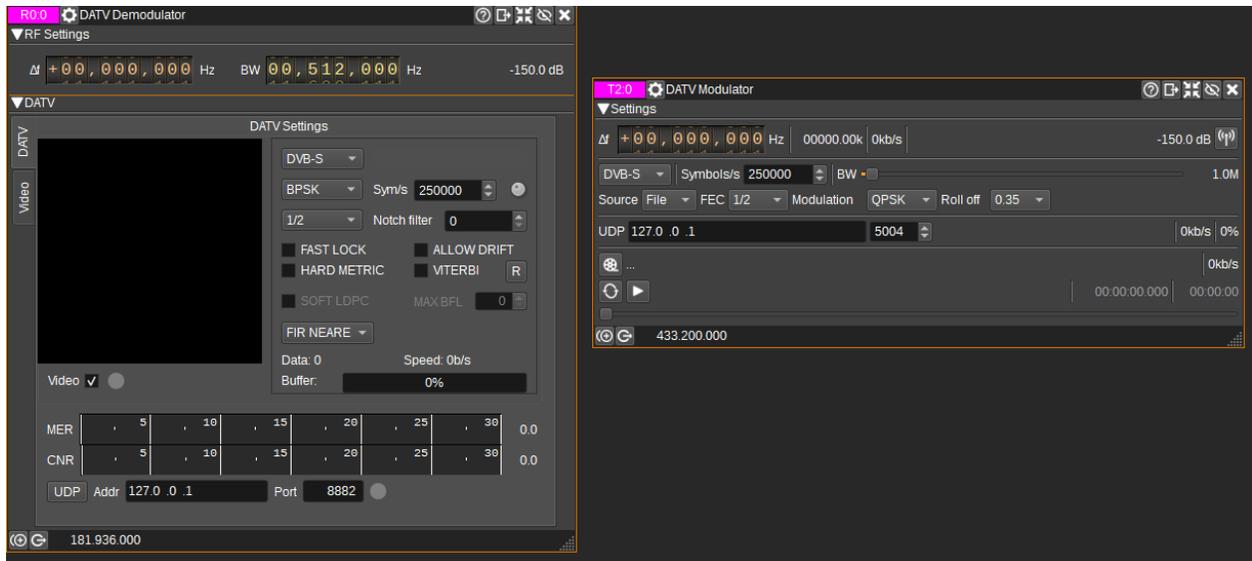


Ilustración 9. Televisión Digital Amateur, como demodulador y modulador en SDRAngel.

Fuente: autor

QPSK se eligió porque ofrece un excelente equilibrio entre eficiencia espectral, robustez frente al ruido y complejidad de implementación, al transmitir 2 bits por símbolo, duplica la tasa de datos de BPSK sin aumentar significativamente el requerimiento de ancho de banda; también es menos susceptible al ruido e interferencias que modulaciones más complejas como 16-QAM o 64-QAM, esto asegura una transmisión confiable en entornos de señal moderada, es una opción comprobada en estándares de radiodifusión digital por su baja exigencia de potencia y facilidad de implementación en SDR como SDRAngel.

CAPITULO II

DISEÑO Y CONFIGURACION DEL ENTORNO

2.1. Arquitectura del sistema

La estructura del entorno de simulación ha sido diseñada por el autor utilizando la herramienta Draw.io, lo que permite una representación visual detallada de los componentes y flujos del sistema. Este diagrama describe las conexiones entre los distintos dispositivos del sistema de SDR, tanto en la recepción como transmisión, en la Ilustración 10 se observa este sistema, el cual está compuesto por el hardware HackRF One, antena para HackRf One, cable USB-Micro USB y una laptop (de donde se opera el software SDRAngel).

La configuración del entorno en SDRAngel ha sido realizada con claridad para tener la comunicación en half-duplex, ya que de esta forma opera HackRF One.



Ilustración 10. Conexiones del sistema, para transmisión y/o recepción de señales de SDR.

Fuente: autor

2.2. Parámetros de transmisión y recepción en SDRAngel

Ahora, se presentan los complementos utilizados en las prácticas posteriores, en donde se detalla todos y cada uno de los parámetros y valores que se muestran en las interfaces:

2.2.1. Complemento de entrada HackRF (recepción)

Este complemento de fuente de muestra de entrada obtiene sus muestras de un dispositivo HackRF [34], véase la Ilustración 11 para observar su interfaz.

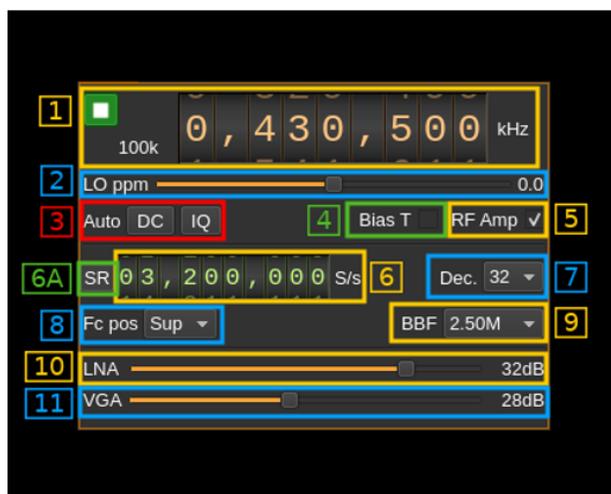


Ilustración 11. Interfaz del complemento de entrada HackRF.

Fuente: [34]

(1) Parámetros comunes de transmisión

En la Ilustración 12 se pueden apreciar los parámetros de transmisión de entrada de HackRF:

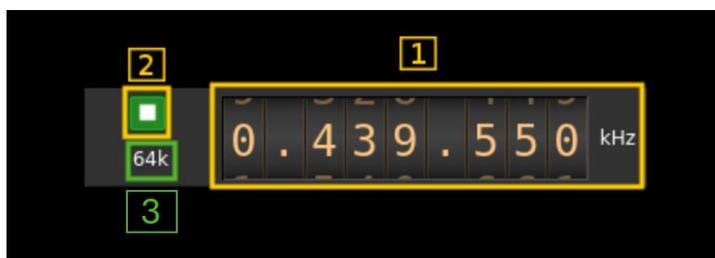


Ilustración 12. Parámetros comunes de transmisión en complemento de entrada HackRF.

Fuente: [34]

(1.1) Frecuencia central de recepción (kHz)

(1.2.) Inicio/Parada

Botón de inicio/parada del dispositivo.

- Icono de triángulo azul: el dispositivo está listo y se puede iniciar
- Icono cuadrado verde: el dispositivo está en funcionamiento y se puede detener

- Icono cuadrado rojo: se produjo un error. En caso de que el dispositivo se haya desconectado accidentalmente, puede hacer clic en el icono, volver a enchufarlo y comenzar de nuevo.

(1.3.) Frecuencia de muestreo de la transmisión

En el modo de entrada de frecuencia de muestreo del dispositivo al host (6A), esta es la frecuencia de muestreo I/Q de banda base en kS/s. Esta es la frecuencia de muestreo del dispositivo al host (6) dividida por el factor de diezmado (7).

(2) Corrección del oscilador local

Utilice este control deslizante para ajustar la corrección LO en ppm. Puede variar de -10,0 a 10,0 en pasos de 0,1.

(3) Opciones de corrección automática

Estos botones controlan las opciones de corrección automática del DSP local:

- DC: eliminar automáticamente el componente DC
- IQ: balance automático de I/Q. La corrección de CC debe estar habilitada para que esto sea efectivo.
- BBF: selección automática de la configuración del filtro de paso de banda. Calcula el mejor valor en función de la frecuencia de muestreo.

(4) Bias T

Utilice esta casilla de verificación para alternar la fuente de alimentación de +5 V en el conector de antena.

(5) Amplificador de RF

Utilice esta casilla de verificación para activar o desactivar el amplificador de ruido extra bajo (LNA). Esto proporciona una ganancia adicional de 14 dB.

(6A) Alternar entrada de frecuencia de muestreo del dispositivo/frecuencia de muestreo de banda base

Utilice este botón de alternancia para cambiar la frecuencia de muestreo de entrada siguiente (6) entre la frecuencia de muestreo del dispositivo y la frecuencia de muestreo de banda base. El botón muestra el modo actual:

- SR: modo de entrada de frecuencia de muestreo del dispositivo. La frecuencia de muestreo de banda base (1,4) es la frecuencia de muestreo del dispositivo (6) dividida por el factor de decimación (7).
- BB: modo de entrada de frecuencia de muestreo de banda base. La frecuencia de muestreo del dispositivo (1,4) es la frecuencia de muestreo de banda base (6) multiplicada por el factor de decimación (7).

(6) Frecuencia de muestreo

Esta es la frecuencia de muestreo del ADC del dispositivo HackRF o la frecuencia de muestreo de banda base en muestras por segundo (S/s). El control (6A) se utiliza para cambiar entre los dos modos de entrada.

Los límites se ajustan automáticamente. En el modo de entrada de banda base, los límites se determinan mediante el factor de decimación (7). Es posible que deba aumentar este factor de decimación para poder alcanzar valores más bajos.

(7) Factor de decimación

El flujo del dispositivo de HackRF se decima para obtener el flujo de banda base. Los valores posibles son: 1, 2, 4, 8, 16, 32; 1 sin decimado, 32 divide la frecuencia de muestreo del flujo del dispositivo por 32.

(8) Posición de la frecuencia central de la banda base en relación con la frecuencia central del receptor HackRF

- Cen: la operación de decimación se lleva a cabo alrededor de la frecuencia central (F_c) del HackRF Rx
- Inf: la operación de decimación tiene lugar alrededor de $F_s - F_c$.
- Sup: la operación de decimación tiene lugar alrededor de $F_s + F_c$.

Con SR (Symbol Rate) como frecuencia de muestreo antes de la decimación, F_c se calcula dependiendo del factor de decimación:

- 2: $F_c = SR/4$
- 4: $F_c = 3*SR/8$
- 8: $F_c = 5*SR/16$
- 16: $F_c = 11*SR/32$
- 32: $F_c = 21*SR/64$
- 64: $F_c = 21*SR/128$

(9) Ancho de banda del filtro Rx

Este es el ancho de banda del filtro Rx en kHz. Los valores posibles son: 1750, 2500, 3500, 5000, 5500, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 12000, 14000, 15000, 20000, 24000, 28000 kHz.

(10) Ganancia interna del LNA

La ganancia del LNA se puede ajustar de 0 dB a 40 dB en pasos de 8 dB.

(11) Ganancia del amplificador de ganancia variable Rx

La ganancia Rx VGA se puede ajustar de 0 dB a 62 dB en pasos de 2 dB.

2.2.2. Complemento de salida HackRF (transmisión)

Este complemento de receptor de muestras de salida envía sus muestras a un dispositivo HackRF [35], véase la Ilustración 13 para observar su interfaz.

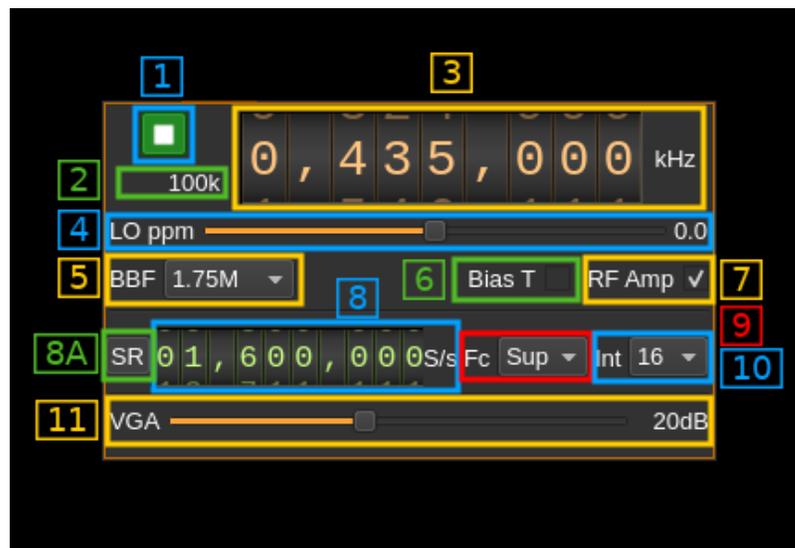


Ilustración 13. Interfaz del complemento de entrada HackRF.

Fuente: [35]

(1) Iniciar/Detener

(2) Frecuencia de muestreo de la transmisión

En el modo de entrada de frecuencia de muestreo de banda base (8A), esta es la frecuencia de muestreo del host al dispositivo en kS/s (kiloSamples/second, mil

muestras por segundo). Esta es la frecuencia de muestreo de banda base (8) multiplicada por el factor de interpolación de software (10).

La latencia de transmisión depende esencialmente del retraso en el FIFO de muestra. El tamaño del FIFO de muestra se calcula para dar un retraso fijo de 250 ms o 150000 muestras, lo que sea mayor. A continuación, en la Ilustración 14 se muestra el retraso en segundos frente a la frecuencia de muestreo de banda base en kS/s desde 48 a 800 kS/s. El retraso de 250 ms se alcanza a 600 kS/s:

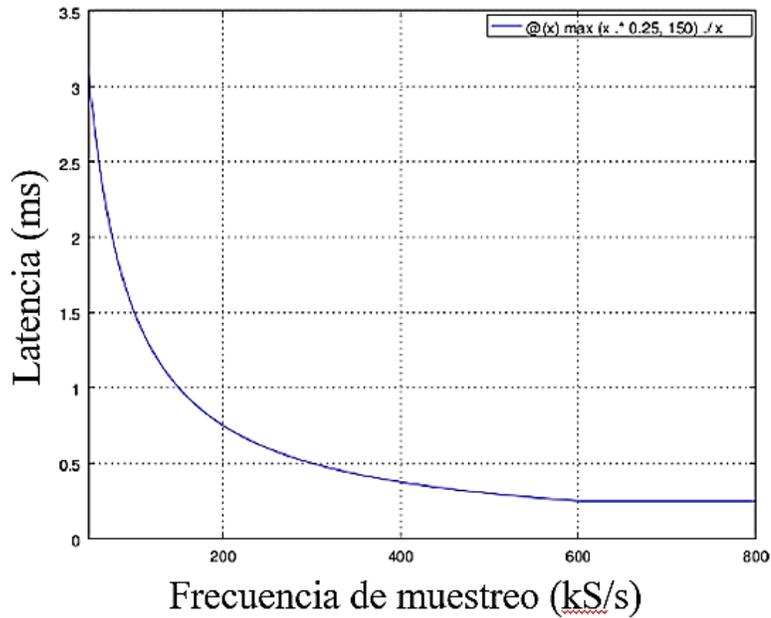


Ilustración 14. Latencia vs. Frecuencia de muestreo.

Fuente: [35]

(3) Frecuencia central de transmisión en kHz.

(4) Corrección del oscilador local

(5) Ancho de banda del filtro Rx

Este es el ancho de banda del filtro Rx en kHz. Los valores posibles son: 1750, 2500, 3500, 5000, 5500, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 12000, 14000, 15000, 20000, 24000, 28000 kHz.

(6) Bias T

(7) Amplificador de RF

Utilice esta casilla de verificación para alternar el amplificador de salida (PA). Este PA proporciona una ganancia adicional de 14 dB.

Según la documentación de HackRF, la potencia de salida cuando el PA está activado y el Tx VGA (10) está a plena potencia (47 dB) es la siguiente:

- 10 MHz a 2150 MHz: 5 dBm a 15 dBm, generalmente aumentando a medida que disminuye la frecuencia
- De 2150 MHz a 2750 MHz: de 13 dBm a 15 dBm
- 2750 MHz a 4000 MHz: 0 dBm a 5 dBm, aumentando a medida que disminuye la frecuencia
- 4000 MHz a 6000 MHz: -10 dBm a 0 dBm, generalmente aumenta a medida que disminuye la frecuencia

(8A) Alternancia de entrada de frecuencia de muestreo de host a dispositivo/frecuencia de muestreo de banda base

Utilice este botón de alternancia para cambiar la frecuencia de muestreo de entrada siguiente (8) entre la frecuencia de muestreo del host al dispositivo y la frecuencia de muestreo de banda base. El botón muestra el modo actual:

- **SR**: modo de entrada de frecuencia de muestreo de host a dispositivo. La frecuencia de muestreo de banda base (2) es la frecuencia de muestreo de host a dispositivo (8) dividida por el factor de interpolación (10).
- **BB**: modo de entrada de frecuencia de muestreo de banda base. La frecuencia de muestreo del host al dispositivo (2) es la frecuencia de muestreo de banda base (8) multiplicada por el factor de interpolación (10).

(8) Frecuencia de muestreo

(9) Posición de la frecuencia central de la banda base en relación con la frecuencia central del transmisor HackRF

Con SR como frecuencia de muestreo después de la interpolación, F_c se calcula dependiendo del factor de interpolación: 2, 4, 8, 16, 32 y 64.

(10) Factor de interpolación

El flujo de banda base se interpola con este valor antes de enviarlo al dispositivo HackRF. Los valores posibles son: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64; 1 sin interpolación, 64 multiplica la frecuencia de muestreo del flujo de banda base por 64.

El búfer de muestras principal se basa en la frecuencia de muestreo de banda base e introducirá un retraso de ~500 ms para la interpolación por 16 o menos y ~1 s para la interpolación por 32.

(11) Ganancia del amplificador de ganancia variable Tx

La ganancia de la señal VGA de transmisión se puede ajustar de 0 dB a 47 dB en pasos de 1 dB.

2.2.2.1. Componente del espectro

En la Ilustración 15, se indican las barras superior e inferior de la interfaz; en la Ilustración 16 se detallan los controles del espectro, los controles están organizados en 6 bloques dispuestos en un diseño de flujo de modo que el tamaño del área de control se pueda adaptar al ancho del espectro, disponiendo los bloques de 4 a 1 línea a medida que el espectro se amplía. Los botones y los distintos controles de cada bloque permanecen en el mismo lugar.

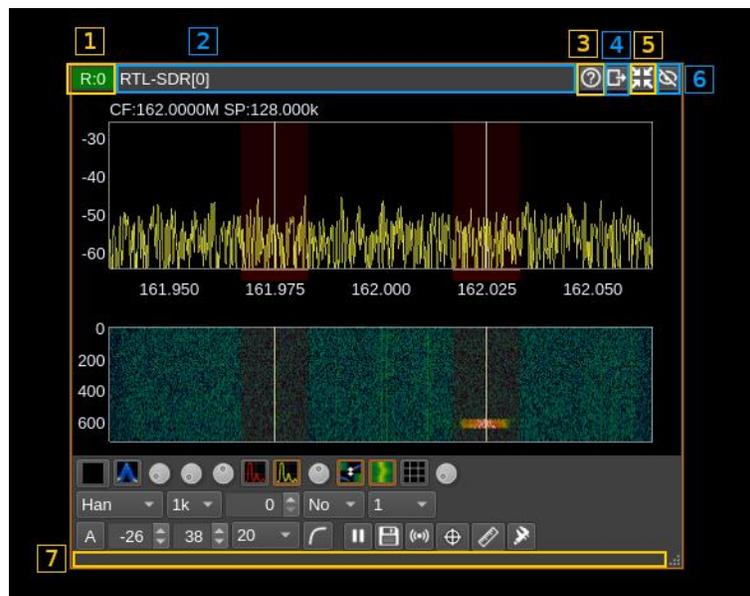


Ilustración 15. Componente del espectro

Fuente: [36]

(1) Índice del dispositivo

Indica el tipo de dispositivo:

- R: receptor
- T: transmisor
- M: MIMO

- (2) Título
- (3) Ayuda
- (4) Moverse a otro espacio de trabajo
- (5) Reducir ventana
- (6) Ocultar ventana
- (7) Área de arrastre de ventana

A continuación, se detallan los 6 bloques de controles:

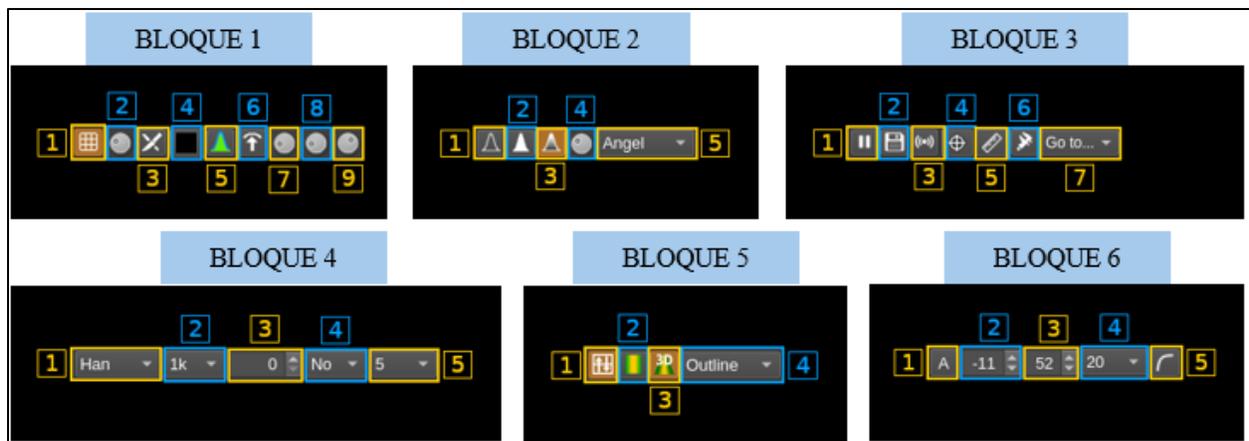


Ilustración 16. Controles del complemento del espectro

Fuente: [37]

- **Bloque 1:**

- (B1.1) Cuadrícula

- (B1.2) Intensidad de la red

- (B1.3) Truncar los dígitos superiores de la escala de frecuencia

Si es posible, trunque los dígitos superiores no significativos en la escala de frecuencia. Esto resulta útil cuando el ancho de banda es mucho menor que la frecuencia central.

- (B1.4) Restablecer el histograma del espectro

- (B1.5) Visualización de fósforo

Alterna la visualización del fósforo en el espectro.

(B1.6) Rastreo de retención máxima

Activa o desactiva la visualización del rastro de retención máxima (trazo rojo) en el espectro

(B1.7) Recorrido de visualización de fósforo y caída de retención máxima

Esto controla la tasa de decaimiento del trazo cuando se activa la pantalla de fósforo. El valor del píxel del histograma se reduce en este valor cada vez que se produce una nueva FFT.

(B1.8) Divisor de caída de retención máxima y recorrido de visualización de fósforo

Cuando se activa la pantalla de fósforo y la disminución de la velocidad de desplazamiento es 1, esto divide la disminución de la unidad por este valor disminuyendo el valor del píxel del histograma en uno cada vez que se ha producido una cantidad de FFT igual a esta cantidad. Por lo tanto, la tasa de disminución real es 1 sobre este valor. Esto permite configurar una tasa de disminución más lenta que una unidad para cada nueva FFT.

(B1.9) Fuerza de trazo de visualización de fósforo

Controla la fuerza del trazo cuando se activa la pantalla de fósforo (B.1.5). El valor del histograma se incrementa en este valor en cada nueva FFT hasta que se alcanza el máximo (rojo).

• **Bloque 2:**

(B2.1) Traza actual con estilo de línea

(B2.2) Traza actual con estilo de relleno

(B2.3) Traza actual con estilo de gradiente

(B2.4) Intensidad de traza

(B2.5) Mapa de colores

Este menú desplegable permite seleccionar una serie de mapas de colores predefinidos que se utilizan para representar el relleno de gradiente del espectro, la cascada 2D y el espectrograma 3D.

• **Bloque 3:**

(B3.1) Espectro de reproducción/pausa

(B3.2) Guardar el espectro en un archivo CSV

(B3.3) Control del servidor Spectrum

Se puede utilizar un servidor basado en websockets para enviar datos de espectro a los clientes. El servidor solo envía datos. El control, incluidos los detalles de FFT, se realiza a través de la API REST.

(B3.4) Cuadro de diálogo de marcadores de espectro

(B3.5) Cuadro de diálogo de mediciones del espectro

(B3.6) Calibración del espectro

(B3.7) Ir al marcador de anotación

Solo aparece si la visualización del espectro es el espectro de un dispositivo y si hay marcadores de anotación visibles.

- **Bloque 4:**

(B4.1) Selector de ventana FFT

Utilice este cuadro combinado para seleccionar qué ventana se aplica a la FFT: Bart, B-H, FT, Ham, Han , Rec, Kai, Blackman y B-H7

(B4.2) Tamaño de la FFT

Seleccione el tamaño de la ventana FFT entre estos valores: 64, 128, 256, 512, 1k, 2k, 4k, 8k, 16k y 32k

(B4.3) Superposición de FFT

Superposición de FFT en número de muestras que superan la mitad del tamaño de FFT. El porcentaje de superposición aparece en la información sobre herramientas. Varía de 0 (sin superposición) a la mitad del tamaño de FFT menos uno (superposición máxima).

(B4.4) Modo de promediado

Utilice esta combinación para seleccionar qué modo de promedio se aplica: No, Mov, Fix y Max

(B4.5) Número de muestras promediadas

El promediado reduce la variación del ruido y se puede utilizar para detectar mejor las señales continuas débiles. El modo de promediado fijo permite un monitoreo de largo plazo en la cascada. El modo máximo ayuda a mostrar ráfagas cortas que pueden aparecer durante el período de "promediado".

- **Bloque 5:**

(B5.1) Colocación en cascada/espectro

Cambia la dirección del flujo de la cascada o el espectrograma de modo que siempre vaya del lado del espectro al lado opuesto.

(B5.2) Cascada (2D)

(B5.3) Espectrograma 3D

(B5.4) Estilo de espectrograma 3D

Este menú desplegable determina cómo se representan los datos del espectrograma 3D, se presentan: puntos, líneas, sólidos, esquema y sombreado.

- **Bloque 6:**

(B6.1) Escala automática

Escala el espectro estableciendo automáticamente el nivel de referencia y el rango en función de los niveles máximo y mínimo. Toma el promedio del tamaño de FFT \div 32 mínimos para el mínimo y 10 dB por encima del máximo para el máximo.

(B6.2) Nivel de referencia

Este es el nivel en dB en la parte superior del rango de visualización. Puede seleccionar valores entre 0 y -110 en pasos de 1 dB

(B6.3) Alcance

Este es el rango de visualización en dB. Puede seleccionar valores entre 1 y 100 en pasos de 1 dB.

(B6.4) Límite de FPS

(B6.5) Escala logarítmica/lineal

Utilice este botón para alternar entre la visualización de escala lineal y logarítmica del espectro; en el modo lineal, el control de rango no tiene efecto porque el rango real está entre 0 y el nivel de referencia, el nivel de referencia en dB sigue aplicándose, pero se traduce a un valor lineal, p. ej., -40 dB es $1e-4$; en el modo logarítmico, los números de escala se formatean utilizando notación científica, de modo que siempre ocupan el mismo espacio.

2.2.3. Complemento de la modulación NFM

2.2.3.1. Complemento demodulador NFM

Este complemento se puede utilizar para escuchar una señal modulada de FM de banda estrecha, lo que significa que el ancho de banda puede variar de 5 a 40 kHz [38], véase la Ilustración 17 para observar su interfaz.

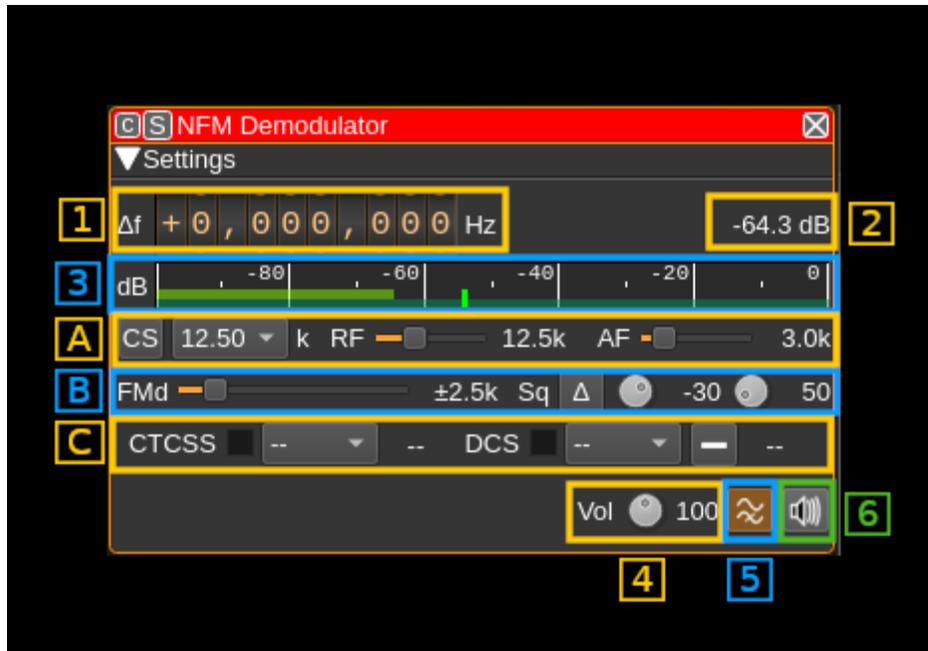


Ilustración 17. Interfaz del demodulador NFM en SDRAngel.

Fuente: [38]

(1) Cambio de frecuencia desde la frecuencia central del valor de recepción

Utilice las ruedas para ajustar el cambio de frecuencia en Hertz desde la frecuencia central de recepción. Haga clic derecho en un dígito para poner a cero todos los dígitos de la derecha. Esto efectivamente reduce el valor a la posición del dígito. Las ruedas se mueven con la rueda del mouse mientras se apunta a la rueda o seleccionándola con el clic izquierdo del mouse y usando las flechas del teclado. Al presionar simultáneamente la tecla Shift, se mueve el dígito en 5 y al presionar la tecla Control, se mueve en 2. Haga clic izquierdo en un dígito para establecer la posición del cursor en ese dígito.

(2) Potencia del canal

Potencia total promedio en dB relativa a una señal de amplitud de +/- 1,0 recibida en la banda de paso.

(3) Medidor de nivel en dB

- Barra superior (verde): valor promedio
- Barra inferior (azul verde): valor pico instantáneo
- Barra vertical de punta (verde brillante): valor de retención pico

(4) Volumen

Este es el volumen de la señal de audio desde el 0 % (silencio) hasta el 200 % (máximo) del volumen con una desviación de frecuencia nominal. Puede variarse de forma continua en pasos del 1 % utilizando el botón giratorio.

(5) Filtro de paso alto de audio

Activa o desactiva un filtro de paso alto con corte de 300 Hz en el audio para cortar las frecuencias CTCSS. Está activado de forma predeterminada para el uso normal de los canales de audio. Puedes desactivarlo para canalizar el audio en programas que requieren DC, como DSD+ o Multimon.

(6) Silenciamiento de audio y selección de salida de audio

Haga clic izquierdo en este botón para silenciar el audio de este canal. El botón se iluminará en verde si el silenciador está abierto. Esto ayuda a identificar qué canales están activos en una configuración multicanal.

(A) Parámetros de RF

En este bloque se encuentran el ajuste preestablecido de espaciado de canales, la selección del espaciado de canal predeterminado, el ancho de banda de RF y el ancho de banda AF.

(B) Parámetros de modulación y silenciamiento

En esta sección se encuentra lo siguiente: la desviación máxima de FM esperada, silenciamiento delta/nivel, umbral de silenciamiento: modo de umbral de potencia y modo delta de frecuencia de audio y puerta de silenciamiento.

(C) CTCSS/DCS

En este bloque se encuentran los siguientes parámetros: CTCSS activado/desactivado, tono CTCSS, valor del tono CTCSS, DCS encendido/apagado, código DCS, mostrar código positivo o negativo y código DCS detectado.

2.2.3.2. Complemento modulador NFM

Este complemento se puede utilizar para generar una señal modulada en frecuencia de banda estrecha, lo que significa que el ancho de banda puede variar de 1 a 40 kHz [39], véase la Ilustración 18 para observar su interfaz.

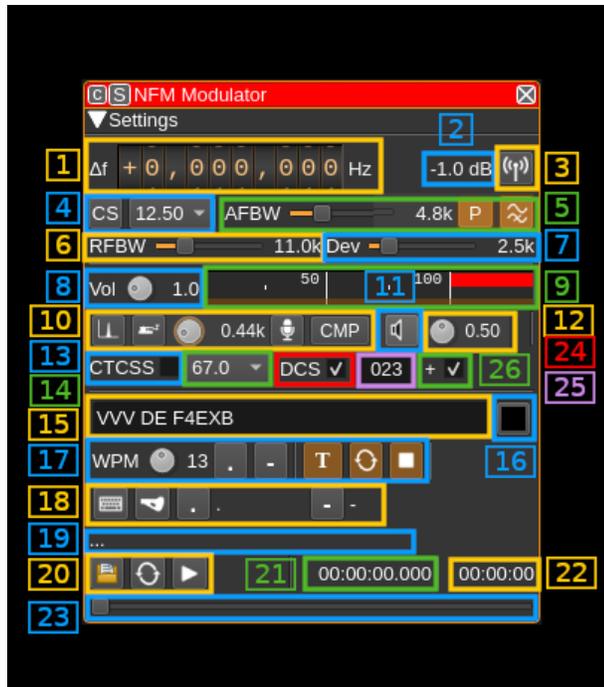


Ilustración 18. Interfaz del modulador NFM de SDRAngel.

Fuente: [39]

- (1) Cambio de frecuencia desde la frecuencia central de transmisión
- (2) Potencia del canal
- (3) Silenciar canal
- (4) Ajustes preestablecidos de espaciado de canales

Al hacer clic en el botón "CS", se aplicarán los ajustes de ancho de banda de RF, ancho de banda de AF y desviación de FM según el esquema de espaciado de canal seleccionado en el cuadro combinado de la siguiente manera (véase la Tabla 3):

Tabla 3. Esquema de espaciado de canal

| CS (kHz) | RFBW (kHz) | AFBW (kHz) | FM Δ (\pm kHz) | β |
|----------|------------|------------|--------------------------|---------|
| 5 | 4.8 | 1.7 | 0.7 | 0.43 |
| 6.25 | 6 | 2.1 | 0.9 | 0.43 |

| | | | | |
|------|-----|-----|-----|------|
| 7.5 | 7.2 | 2.5 | 1.1 | 0.43 |
| 8.33 | 8 | 2.8 | 1.2 | 0.43 |
| 12.5 | 11 | 3 | 2.5 | 0.83 |
| 25 | 16 | 3 | 5 | 1.67 |
| 40 | 36 | 9 | 9 | 1 |

Al cambiar el ancho de banda de RF, la selección de espaciado de canal en el cuadro combinado se ajusta para adaptarse a este ancho de banda.

(5) Filtros de audio

- El control deslizante controla el ancho de banda en kHz de la señal moduladora filtrada antes de la modulación.
- El botón del interruptor "P" activa o desactiva el preénfasis (fijo 120 μ s)
- El botón más a la derecha activa o desactiva el filtro de paso alto de 300 Hz cuando no hay ningún CTCSS ni DCS activo.

(6) Ancho de banda de RF

(7) Desviación de frecuencia

(8) Volumen

(9) Medidor de nivel en porcentaje (%)

(10) Control de fuente de entrada

A continuación, se presenta la interfaz del control de fuente de entrada, mostrada mediante la Ilustración 19:

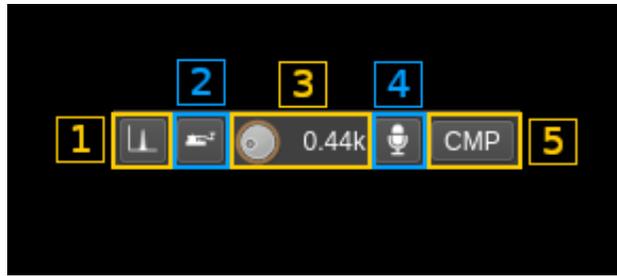


Ilustración 19. Control de fuente de entrada en complemento modulador NFM.

Fuente: [39]

(10.1) Selección de entrada de tono

(10.2) Selección de entrada del manipulador Morse

(10.3) Frecuencia de tono (kHz)

Ajusta la frecuencia del tono de 0,1 a 2,5 kHz en pasos de 0,01 kHz

(10.4) Seleccionar entrada de audio y seleccionar dispositivo de entrada de audio

(10.5) Compresión de entrada de audio

(11) Retroalimentación de audio

(12) Volumen de retroalimentación de audio

(13) Interruptor CTCSS

(14) Frecuencia de tono CTSS (Hz)

(15) Texto en CW (Código Morse)

(16) Borrar texto CW

(17) Controles del manipulador Morse (línea 1)

En esta sección se encuentran varias opciones para la configuración de Código Morse, como: la velocidad de manipulación en CW, la clave de puntos, tecleo de guiones Introducción de texto, repetición automática de texto y reproducir/detener texto.

(18) Controles del manipulador Morse (línea 2)

En este bloque se encuentran: activar el control del teclado y del ratón mediante teclas morse, yámbico o recto, panel de control del ratón, tecla de punto de registro y registrar la tecla de guion.

(19) Ruta del archivo de audio

(20) Controles de reproducción de archivos de audio

Se encuentran opciones como la selección del archivo de audio, bucle de archivo de audio y reproducción/pausa de archivo.

(21) Reproducir la posición actual del archivo

(22) Duración del archivo de reproducción

(23) Control deslizante de posición del archivo de reproducción

(24) Conmutador DCS

Casilla de verificación para activar la modulación de sub-audio DCS (Silenciador de código digital).

(25) Código DCS

Este es el código octal DCS (0.511 en decimal 0.777 en octal)

(26) Modulación positiva DCS

Cuando está marcada, los bits "1" se representan con una frecuencia de desplazamiento positiva y los "0" con un desplazamiento negativo. Cuando no está marcada (modulación negativa), es lo opuesto.

2.2.4. Complementos de la modulación AM

2.2.4.1. Complemento demodulador AM

Permite recuperar la señal modulada a partir de una portadora AM recibida. Esto es útil para decodificar señales de audio o video de transmisión en AM [40].

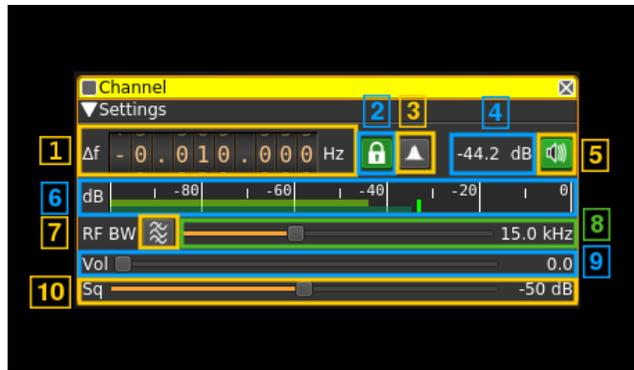


Ilustración 20. Complemento demodulador AM en SDRAngel

Fuente: [40]

(1) Frecuencia del canal

Especifica la frecuencia central del canal según el modo de entrada de frecuencia:

- Δf - Desplazamiento en Hz desde la frecuencia central del dispositivo;
- MW - Frecuencia absoluta en kHz.
- 25k - Frecuencia absoluta en MHz.
- 8.33k - Número de canal Airband 8.33kHz.

(2) PLL y AM sincrónico

Utilice este botón para activar o desactivar el bloqueo del PLL y la detección de AM sincrónica. Cuando está activado, la señal de entrada se mezcla con el NCO del PLL que se bloquea en la portadora de la transmisión AM. Luego, la señal se procesa como una señal modulada DSB o SSB (consulte el control 3). La principal ventaja en comparación con la detección de envolvente es una mejor resistencia al desvanecimiento selectivo de la portadora. Esto no evita toda la distorsión por desvanecimiento selectivo, pero soluciona la más molesta.

Cuando el PLL está bloqueado, el icono se ilumina en verde. El cambio de frecuencia de la portadora aparece en la información sobre herramientas. El indicador de bloqueo es bastante nítido, con un rango de aproximadamente ± 100 Hz.

(3) Selección DSB/SSB

Utilice el botón izquierdo del ratón para alternar entre el funcionamiento DSB y SSB. A veces, una de las dos bandas laterales se ve afectada por interferencias. Seleccionar SSB puede ayudar a utilizar solo la banda lateral sin interferencias. Haga clic derecho para abrir un cuadro de diálogo para seleccionar qué banda lateral se utiliza (LSB o USB).

(4) Potencia del canal

Potencia total promedio en dB relativa a una señal de amplitud de +/- 1,0 recibida en la banda de paso.

(5) Silenciamiento de audio y selección de salida de audio

(6) Medidor de nivel en dB

- Barra superior (verde): valor promedio
- Barra inferior (azul verde): valor pico instantáneo
- Barra vertical de punta (verde brillante): valor de retención pico

(7) Alternar filtro boxcar de paso de banda

Utilice este botón para habilitar o deshabilitar el filtro de paso de banda (afilado) con corte bajo a 300 Hz y corte alto a la mitad del ancho de banda de RF. Esto puede ayudar a mejorar la legibilidad de señales bajas en las comunicaciones de tráfico aéreo, pero degrada el audio en transmisiones de radio AM cómodas.

(8) Ancho de banda de RF

Se trata del ancho de banda en kHz de la señal del canal antes de la demodulación. Puede configurarse de forma continua en pasos de 1 kHz desde 1 hasta 40 kHz.

(9) Volumen

(10) Umbral de silenciamiento

Este es el umbral de silenciamiento en dB. La potencia total promedio recibida en el ancho de banda de la señal antes de la demodulación se compara con este valor y la entrada de silenciamiento se abre por encima de este valor. Se puede variar de forma continua en pasos de 0,1 dB desde 0,0 a -100,0 dB utilizando el botón giratorio.

2.2.4.2. Complemento modulador AM

Permite generar señales de amplitud modulada al ajustar la amplitud de la portadora de acuerdo con la señal de entrada [41], véase la Ilustración 21:

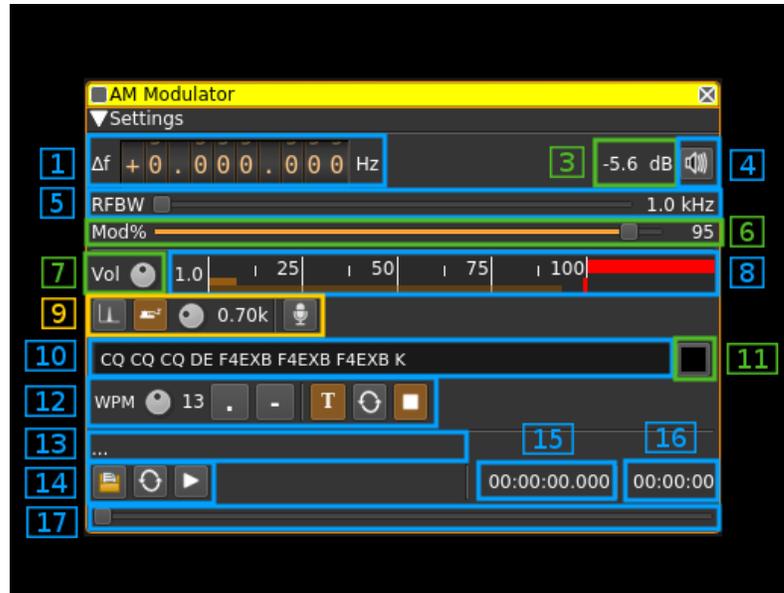


Ilustración 21. Complemento modulador AM en SDRAngel

Fuente: [41]

- (1) Cambio de frecuencia desde la frecuencia central de transmisión
- (3) Potencia del canal
- (4) Silenciar canal
- (5) Ancho de banda de RF
- (6) Nivel de modulación
- (7) Volumen
- (8) Medidor de nivel en %
- (9) Control de fuente de entrada

En esta sección se puede encontrar varias funciones como selección de entrada de tono, selección de entrada del manipulador Morse, frecuencia de tono (kHz), y seleccionar entrada de audio y seleccionar dispositivo de entrada de audio.

- (10) Texto en CW (Morse)
- (11) Borrar texto CW
- (12) Controles del manipulador Morse

En esta sección se encuentran los controles: velocidad de manipulación en CW, clave de puntos, tecleo de guiones, introducción de texto, repetición automática de texto y reproducir/detener texto, activar el control del teclado y del ratón mediante teclas morse, yámbico o recto, panel de control del ratón, tecla de punto de registro y registrar la tecla de guion.

(13) Ruta del archivo de audio

(14) Controles de reproducción de archivos de audio

En esta sección se encuentran las opciones: selección de archivo de audio (debe estar en formato mono 48 kHz F32LE raw), bucle de archivo de audio y reproducir/pausar la reproducción de archivos.

(15) Reproducir la posición actual del archivo

(16) Duración del archivo de reproducción

(17) Control deslizante de posición del archivo de reproducción

2.2.5. Complemento DATV (modulación QPSK)

2.2.5.1. Complemento demodulador DATV

Este complemento se puede utilizar para ver transmisiones de televisión analógica digital amateur, también conocidas como DATV. El único estándar compatible por ahora es DVB-S en varias modulaciones. La modulación estándar es QPSK, pero se pueden seleccionar configuraciones experimentales con otras modulaciones PSK (BPSK, 8PSK, QAMn) [42], véase la Ilustración 22 para observar su interfaz.

Se utiliza todo el ancho de banda disponible para el canal, es decir, funciona a la frecuencia de muestreo del dispositivo, posiblemente reducida a una potencia de dos en el complemento de origen.

Debe tener en cuenta que la compatibilidad con DVB-S2 es experimental. Es posible que deba modificar algunos ajustes para lograr el bloqueo y la decodificación de la constelación [42].

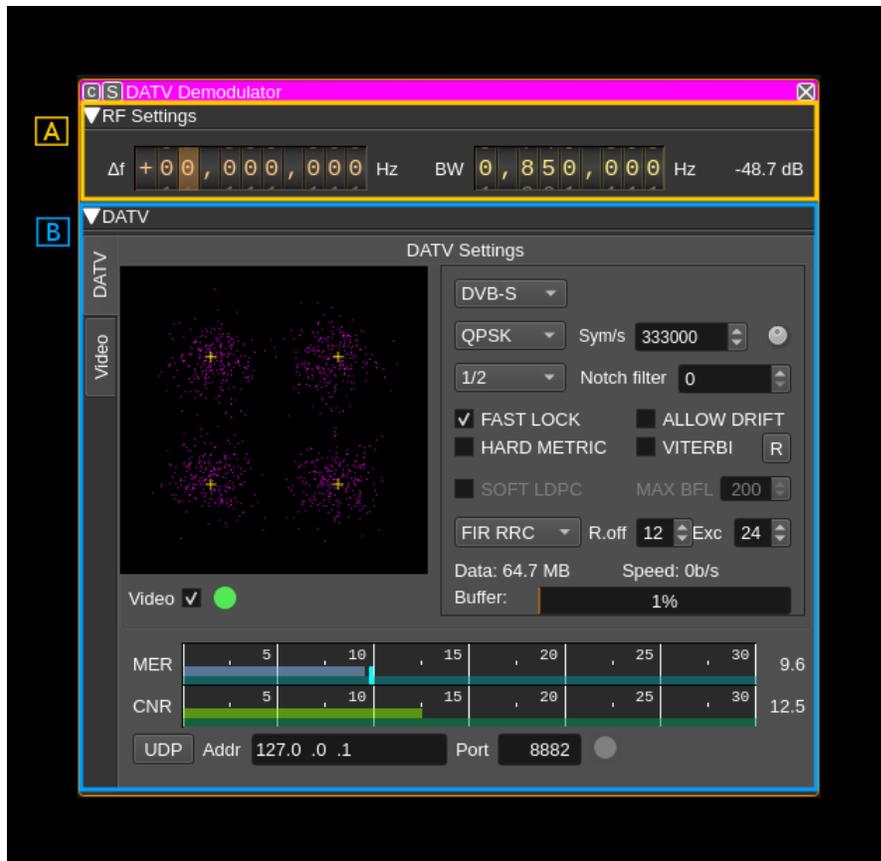


Ilustración 22. Interfaz general de DATV en SDRAngel.

Fuente: [42]

(A) Configuración de RF

En este bloque se encuentran ajustes como: desplazamiento de frecuencia del canal, ancho de banda de RF y potencia del canal.

(B) Sección DATV

En esta sección se presentan los parámetros y valores a tomar en cuenta para la correcta recepción de señales, véase la Ilustración 23:

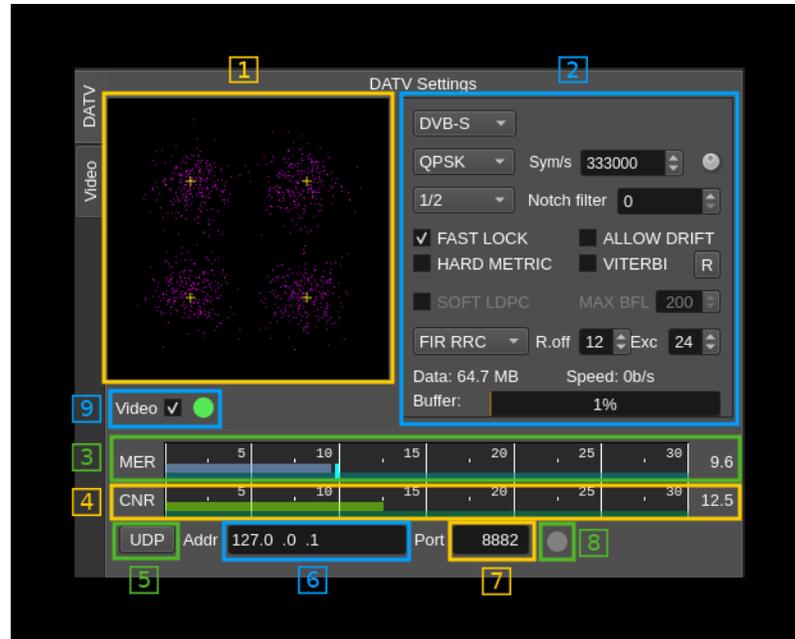


Ilustración 23. Interfaz detallada de la sección DATV en SDRAngel.

Fuente: [42]

(B.1) Constelación de símbolos

Esta es la constelación de la señal sincronizada PSK o QAM. Cuando los parámetros de demodulación están configurados correctamente (tipo de modulación, velocidad de símbolo y filtrado) y la señal es lo suficientemente fuerte como para recuperar la sincronización de símbolos, aparecen puntos violetas cerca de las cruces blancas. Las cruces blancas representan las posiciones ideales de los símbolos en el plano I/Q.

(B.3) Estimación del MER

(B.4) Estimación de CNR

Este indicador proporciona la estimación de la CNR. La estimación se realiza comparando la potencia del espectro en el centro de la banda de paso en comparación con los lados. La banda de paso es la que se presenta al demodulador y siempre es el doble de la tasa de símbolos. El "centro" se estima en el 60% de la banda de paso completa. Tenga en cuenta que el filtro de RF viene antes de eso y puede cambiar el aspecto del espectro, por lo que la mejor estimación se obtiene cuando el ancho del filtro de RF es cercano al doble de la tasa de símbolos y el entorno es silencioso. Esto también significa que debe aplicar la tasa de símbolos correcta.

(B.5) Flujo de transporte de salida a UDP

Activar la salida del flujo de transporte a UDP con 7 bloques TS por trama UDP

(B.6) Dirección UDP

(B.7) Puerto UDP

(B.8) Indicador de transmisión UDP

(B.9) Habilitación e indicador del reproductor de vídeo

(B.2) Configuración de la señal DATV

Ahora, en la Ilustración 24 se puede observar la interfaz de la configuración de la señal DATV, se aprecian varios parámetros, entre ellas la modulación a utilizar:

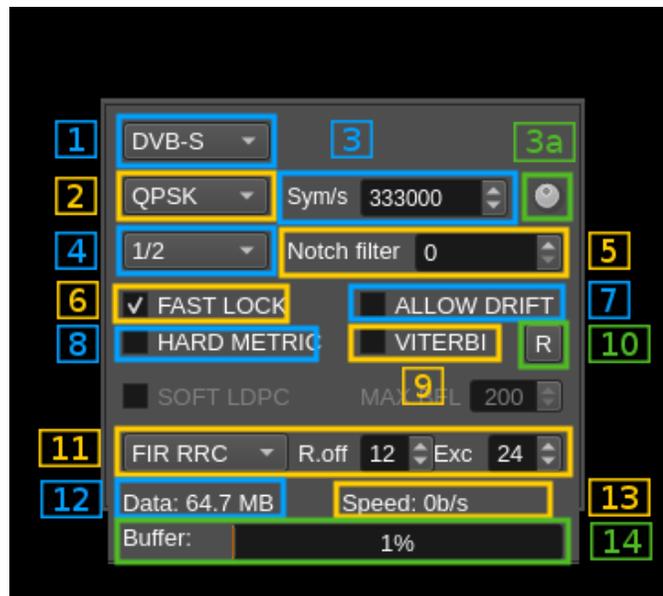


Ilustración 24. Interfaz de configuración de señal DATV en SDRAngel.

Fuente: [42]

(B.2.1) Estándar DATV

- DVB-S: DVB-S
- DVB-S2: DVB-S2 y algunos DVB-S2X

(B.2.2) Tipo de modulación

- DVB-S: Normalmente solo se admiten QPSK y BPSK (adición posterior) en el estándar, pero el uso de radioaficionados ha abusado un poco del estándar, por lo que también se admiten PSK6, QAM16, QAM64 y QAM256.

- DVB-S2: QPSK, PSK8, APSK16, APSK32, APSK64e (DVB-S2X)

Las constelaciones son las siguientes:

- BPSK: modulación por desplazamiento de fase binaria. Los símbolos están en las posiciones $\pi/4$ y $-3\pi/4$.
- QPSK: modulación por desplazamiento de fase en cuadratura. Los símbolos están en las posiciones $\pi/4$, $3\pi/4$, $-3\pi/4$ y $-\pi/4$.
- PSK8: codificación por desplazamiento de 8 fases, también conocida como $\pi/4$ QPSK. Los símbolos están en las posiciones 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $-3\pi/4$, $-\pi/2$ y $-\pi/4$.
- APSK16: modulación por desplazamiento de amplitud y fase con 16 símbolos
- APSK32: modulación por desplazamiento de amplitud y fase con 32 símbolos
- APSK64e: modulación por desplazamiento de amplitud y fase con 64 símbolos
- QAM16: modulación de amplitud en cuadratura con 16 símbolos
- QAM64: modulación de amplitud en cuadratura con 64 símbolos
- QAM256: modulación de amplitud en cuadratura con 256 símbolos

(B.2.3) Velocidad de símbolos (Bd)

(B.2.3a) Establecer la velocidad de símbolo DATV estándar

Utilice este dial para recorrer las velocidades de símbolo DATV estándar: 25, 33, 66, 125, 250, 333, 500, 1000, 1500, 2000 kSym/S

(B.2.4) Tasa de FEC

Depende del estándar y la modulación.

- DVB-S con todas las modulaciones: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8.
- DVB-S2 y QPSK: 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
- DVB-S2 y PSK8: 3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10
- APSK16 (DVB-S2): 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
- APSK32 (DVB-S2): 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
- APSK64E (DVB-S2): 4/5, 5/6

(B.2.5) Filtro rechaza banda

Intenta corregir la forma del espectro de la señal eliminando los picos. Esta es la cantidad de picos que se deben rastrear. Es más seguro mantener el valor predeterminado 0 (sin muesca).

(B.2.6) Bloqueo rápido (solo DVB-S)

Descodificación de señal más rápida, pero puede generar más errores al inicio.

(B.2.7) Permitir deriva (solo DVB-S)

(B.2.8) Métricas estrictas (solo DVB-S)

Endurecimiento de la constelación.

(B.2.9) Viterbi (sólo DVB-S)

Decodificación de Viterbi. Tenga en cuenta que esto consume muchos recursos de la CPU. En la práctica, debería limitarse a FEC 1/2, 2/3 y 3/4.

(B.2.10) Restablecer valores predeterminados

(B.2.11) Filtro

- FIR lineal
- FIR más cercano
- RRC (raíz del coseno elevada)

Cuando se selecciona RRC, los controles adicionales para el factor de reducción gradual (%) y la excursión de la envolvente (dB) son efectivos. Cuanto menor sea el factor de reducción gradual, más pronunciados serán los lados del filtro. Un valor más alto de la excursión de la envolvente puede resultar útil en el caso de señales débiles.

En la práctica, el filtro RRC es obligatorio para la decodificación adecuada de señales normales a débiles. Las señales fuertes pueden decodificarse en cualquier condición.

(B.2.12) Cantidad de datos decodificados

(B.2.13) Velocidad de transmisión

(B.2.14) Estado del buffer

C) Transmisión de vídeo DATV

En la Ilustración 25 se muestran varios parámetros a tomar en cuenta para observar si se está teniendo o no una correcta recepción de señal:



Ilustración 25. Interfaz de transmisión de video en DATV en SDRAngel.

Fuente: [42]

(C.1) Imagen

El vídeo decodificado se muestra aquí

(C.2) Información de la transmisión

(C.3) Estado de decodificación de la transmisión

Estas casillas de verificación que no se pueden seleccionar informan el estado de decodificación (se marcan cuando están en modo correcto):

- Datos: recepción en curso
- Transporte: flujo de transporte detectado
- Vídeo: datos de vídeo detectados
- Decodificación: video que se está decodificando

(C.4) Silenciamiento de vídeo

Botón para pausar o iniciar la decodificación de video. Esto también indica el estado del video:

- Gris (sin color): no hay transmisión de video
- Verde: hay una transmisión de video presente y decodificada correctamente

- Rojo: hay una transmisión de video, pero falla la decodificación

(C.5) Silenciamiento de audio

(C.6) Volumen del audio

(C.7) Control del volumen del audio

2.2.5.2. Complemento modulador DATV

Este complemento se puede utilizar para transmitir una señal de TV digital amateur en los estándares DVB-S o DVB-S2. El complemento requiere que el video y el audio que se van a transmitir estén en un flujo de transporte MPEG. El flujo de transporte MPEG se puede leer desde un archivo o transmitir a través de UDP [43], véase la Ilustración 26 para observar su interfaz.

El flujo de transporte MPEG debe (por ahora) crearse fuera de SDRangel, utilizando software como ffmpeg. El flujo de transporte MPEG puede contener vídeo comprimido utilizando códecs como MPEG-2, h264 o h265 (HEVC). De forma similar, el audio puede ser MPEG-2, MP3 u Opus. Los ajustes como la resolución del vídeo están determinados por el software utilizado para crear el flujo de transporte MPEG. El complemento modulador DATV simplemente realiza la codificación de canal y la modulación del flujo de transporte según el estándar DVB-S [43].

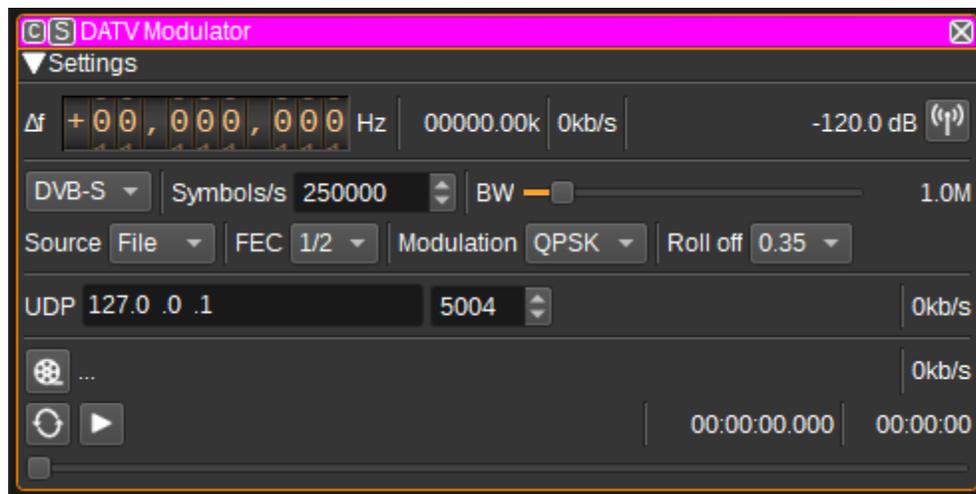


Ilustración 26. Interfaz del modulador DATV en SDRangel.

Fuente: [43]

(1) Cambio de frecuencia desde la frecuencia central de transmisión

(2) Frecuencia de muestreo

(3) Velocidad de datos

Esta cifra es la velocidad de datos admitida por el canal DVB-S, según lo determinado por los ajustes que se indican a continuación. Esta es la velocidad máxima a la que se puede transmitir un flujo de transporte, por lo que este valor debe ser mayor o igual a la velocidad de bits requerida para el flujo de transporte, si se requiere decodificación en tiempo real en el receptor. Si esta velocidad es mayor que la velocidad de bits requerida para un archivo de flujo de transporte, el modulador transmitirá paquetes nulos para intentar transmitir el flujo a la velocidad requerida. Si el flujo de transporte se realiza a través de UDP, se transmitirán paquetes nulos cuando no haya datos disponibles en el puerto UDP.

(4) Potencia del canal

Potencia total promedio en dB relativa a una señal de amplitud de $\pm 1,0$ generada en la banda de paso.

(5) Silenciar canal

(6) Estándar

Seleccione el estándar DVB que se utilizará para la codificación y modulación de canales. Puede ser DVB-S o DVB-S2.

(7) Velocidad de símbolos

Especifica la velocidad de símbolos en símbolos por segundo, las velocidades de símbolos mucho más altas transmiten flujos de transporte con mayor velocidad de bits, pero requieren un mayor ancho de banda.

(8) Ancho de banda

(9) Fuente de flujo de transporte

Este cuadro combinado le permite elegir la fuente del flujo de transporte MPEG:

- Archivo: archivo de flujo de transporte leído desde el archivo seleccionado con el botón (16).
- UDP: flujo de transporte recibido a través del puerto UDP (14)

Al utilizar UDP, el tamaño del paquete debe ser un múltiplo entero del tamaño del paquete del flujo de transporte MPEG, que es 188 bytes. 1316 bytes es un valor común.

(10) CEF

Tasa de código de corrección de errores de reenvío. Controla la cantidad de bits enviados para ayudar al receptor a corregir errores. Una tasa de código de 1/2 tiene la mayor sobrecarga (que corresponde a una tasa de datos más baja), pero permite corregir la mayor cantidad de errores. 7/8 (DVB-S) o 9/10 (DVB-S2) tiene la menor sobrecarga (que corresponde a tasas de datos más altas), pero permitirá corregir la menor cantidad de errores.

(11) Modulación

Seleccione la modulación que se utilizará. Para DVB-S, puede ser BPSK o QPSK. Para DVB-S2, puede ser QPSK, 8PSK, 16APSK o 32PSK.

BPSK transmite un solo bit por símbolo, mientras que QPSK transmite dos bits por símbolo, por lo que tiene el doble de velocidad de bits. De manera similar, 8PSK tiene 3 bits por símbolo, 16APSK 4 y 32PSK 5. BPSK, QPSK y 8PSK solo modulan la fase. 16APSK y 32APKS modulan tanto la fase como la amplitud.

(12) Caída (de amplitud)

Reducción gradual del filtro de coseno elevado. Para DVB-S, debe ser 0,35. Para DVB-S2, puede ser 0,2, 0,25 o 0,35.

(13) Dirección IP UDP

(14) puerto UDP

(15) Tasa de bits UDP

(16) Selección de archivo de flujo de transporte

(17) Reproducir en bucle

(18) Reproducir/Pausa

(19) Posición actual del archivo de flujo de transporte

(20) Velocidad de bits del archivo de flujo de transporte

Esta es la tasa de bits en kb/s del archivo de flujo de transporte. Debe ser menor o igual a la tasa de datos DVB.

(21) Longitud del archivo de flujo de transporte

(22) Control deslizante de posición del archivo de flujo de transporte

2.3. Especificaciones técnicas del entorno de simulación

2.3.1. Parámetros de configuración para modulación NFM: Práctica 1:

En esta práctica, el autor empleará dos dispositivos HackRF One, uno para la transmisión y otro para la recepción de audio modulado en frecuencia de banda estrecha. El autor seleccionará parámetros de modulación mientras se transmite una señal de Código Morse, se escogió esta señal debido a que es más fácil de demodular, principalmente por la simplicidad de su estructura.

De acuerdo con las configuraciones para esta práctica, se recomienda realizar las pruebas a una distancia prudente de 50 a 100 metros en condiciones de línea de vista, sin obstáculos significativos entre transmisor y receptor, en un entorno interior o con obstrucciones, la distancia podría reducirse de 10 a 20 metros, ya que factores como paredes y otros obstáculos pueden degradar la calidad de la señal; cabe aclarar que estas distancias varían acorde a la frecuencia que se esté utilizando.

A continuación, se mencionan las configuraciones de los complementos de SDRAngel que se utilizan en la práctica, cabe aclarar que las configuraciones que se presentan en esta y las demás prácticas varían acorde a la frecuencia que se esté utilizando:

- **Transmisión, HackRF** (Ilustración 27): en la transmisión (Tx), se opera en la banda de VHF a una frecuencia de 161 MHz. Para mejorar la potencia de transmisión, se ha activado el amplificador de radiofrecuencia (RF Amp), obteniendo una ganancia adicional de 14 dB. La tasa de muestreo se ha establecido en 4 MS/s (mega muestras por segundo), mientras que el filtro de paso de banda (BBF) está ajustado a 1.75 MHz, lo cual limita el ancho de banda de la señal transmitida para mejorar la calidad y reducir interferencias. Además, se ha configurado el amplificador de ganancia variable (VGA) a 43 dB, lo que ajusta aún más la amplitud de la señal, optimizando su transmisión dentro de las especificaciones del sistema

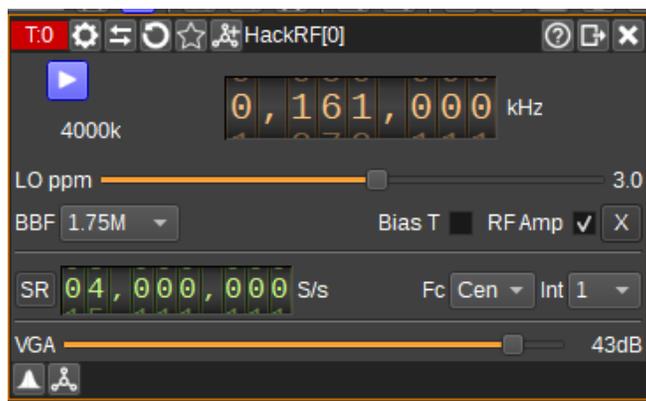


Ilustración 27. Configuración para Práctica 1 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: transmisión.

Fuente: autor

- **Recepción, HackRF** (Ilustración 28): en la configuración de recepción (Rx), se sintoniza la misma frecuencia de operación de 161 MHz en la banda VHF para establecer un enlace de comunicación con el transmisor. Para la recepción, se ha ajustado la tasa de muestreo a 2.5 MS/s (mega muestras por segundo), una cantidad menor que en la transmisión, lo cual se justifica por la necesidad de reducir la cantidad de datos procesados, optimizando así el ancho de banda de la señal recibida y minimizando la carga de procesamiento en el receptor. Para mejorar la sensibilidad y la calidad de la señal recibida, se ha activado el amplificador de RF (RF Amp) y se ha configurado el amplificador de bajo ruido (LNA) en 35 dB. Además, el filtro de paso de banda (BBF) se ajusta a 2.75 MHz, y el amplificador de ganancia variable (VGA) se configura a 10 dB, lo que permite un control fino de la ganancia de señal para obtener una recepción óptima sin distorsiones significativas.

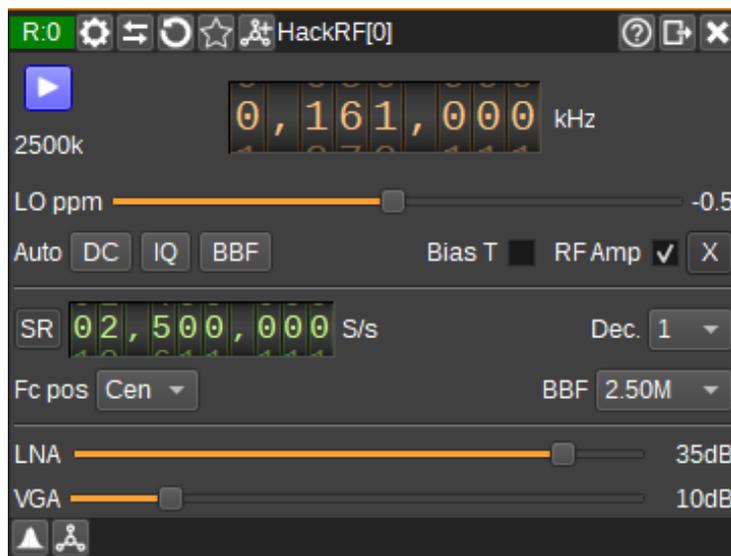


Ilustración 28. Configuración para Práctica 1 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción.

Fuente: autor

- **Transmisión, NFM Modulator** (Ilustración 29): en cuanto a ancho de banda, de audio (AFBW) es de 15 kHz y de radiofrecuencia (RFBW) es de 30 kHz, la desviación de frecuencia (Dev) está ajustada a 12 kHz, lo cual define la amplitud máxima de la señal modulada en frecuencia, de esta manera se transmite audio de una manera clara.

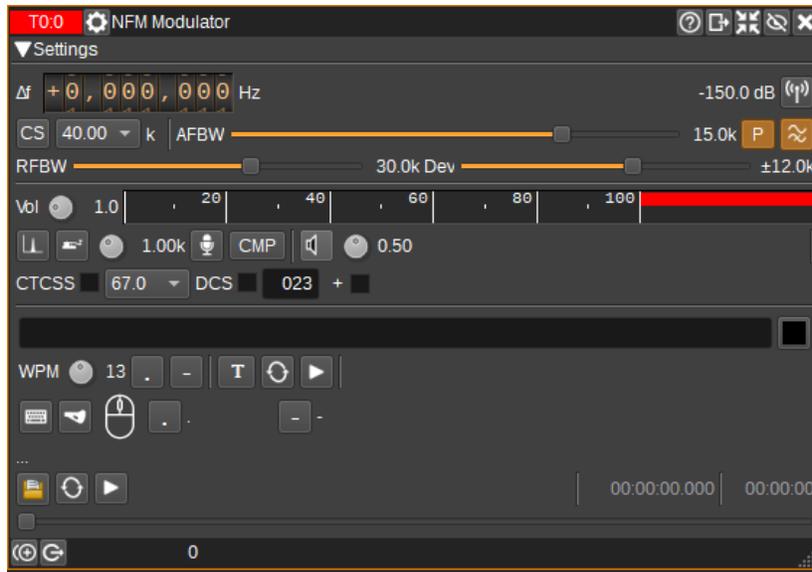


Ilustración 29. Configuración para Práctica 1 de complemento ‘NFM Modulator’ en SDRangel: transmisión.

Fuente: autor

- **Recepción, NFM Demodulator** (Ilustración 30): en ancho de banda de radiofrecuencia (RF) de 30 kHz y de audio (AF) de 12 kHz, en donde se ajusta la sensibilidad de la señal recibida a las frecuencias de interés; la demodulación de FM (FMd) se establece en 1 kHz, y se utiliza el silenciamiento basado en el nivel de audio (AF) para reducir el ruido de fondo.

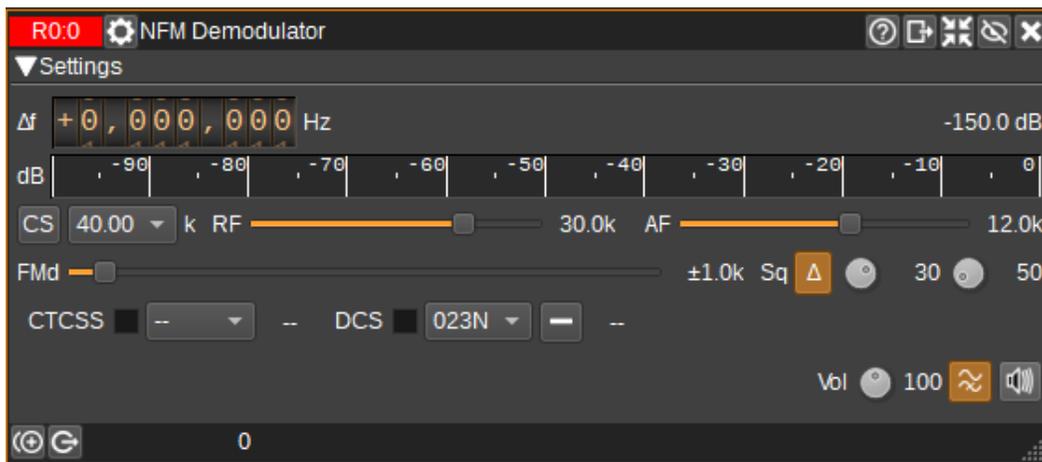


Ilustración 30. Configuración para Práctica 1 de complemento ‘NFM Demodulator’ en SDRangel: recepción.

Fuente: autor

2.3.2. Parámetros de configuración para modulación AM: Práctica 2:

Al igual que en la práctica anterior, en esta práctica, el autor empleará dos dispositivos HackRF One, uno para la transmisión y otro para la recepción de audio modulado en frecuencia de banda estrecha. El autor seleccionará parámetros de modulación mientras se transmite una señal de voz generada en tiempo real.

Para un entorno abierto y con línea de vista, con las configuraciones (dadas posteriormente) podría alcanzar aproximadamente 20 a 50 metros como distancia máxima práctica. Esto se debe a que las ondas de UHF son más susceptibles a la atenuación y se degradan más rápidamente con la distancia, además de que la modulación AM es más sensible a las interferencias y al ruido, en un entorno con obstáculos la distancia máxima podría reducirse a aproximadamente 10 a 20 metros.

Las configuraciones que se presentan a continuación, de cada complemento que se utiliza en esta práctica:

- **Transmisión, HackRF** (Ilustración 31): en la transmisión (Tx), se transmite a una frecuencia de 450.7 MHz; el BBF (filtro de paso de banda) está configurado en 1.75 MHz, limitando el ancho de banda de la señal para mantener la calidad dentro de la banda establecida; la tasa de muestreo (Sample Rate - SR) se ajusta a 3.5 MS/s (mega muestras por segundo), así se optimiza la resolución y eficiencia de la transmisión AM, el amplificador de ganancia variable (VGA) se configura en 46 dB para incrementar la amplitud de la señal y asegurar que llegue con suficiente fuerza al receptor.

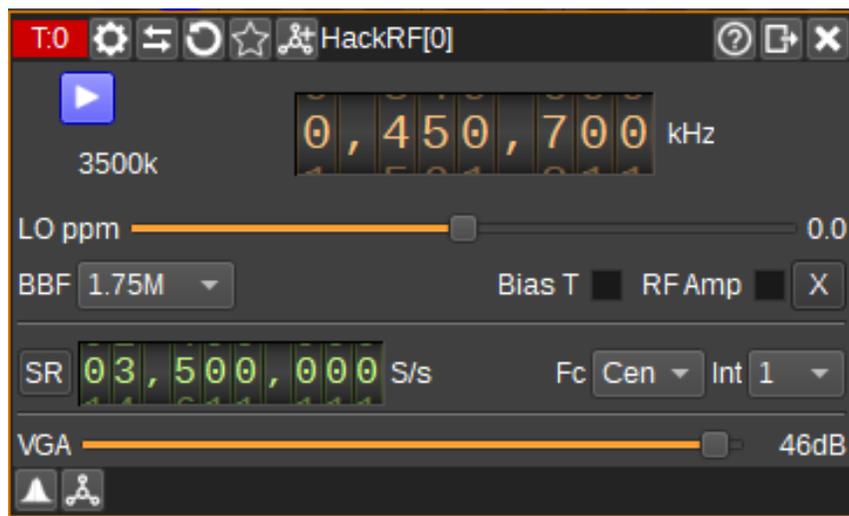


Ilustración 31. Configuración para Práctica 2 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: transmisión.

Fuente: autor

- **Recepción, HackRF** (Ilustración 32): en la recepción (Rx), se sintoniza en la frecuencia de 450.7 MHz para captar la señal transmitida. Se ha activado el amplificador de RF (RF Amp) para mejorar la sensibilidad de recepción. La tasa de muestreo está configurada en 2.5 MS/s, que proporciona un equilibrio adecuado entre la resolución de la señal y la carga de procesamiento. El filtro de paso de banda (BBF) está ajustado a 2.50 MHz, limitando el ancho de banda para capturar solo la señal relevante y minimizar el ruido. Además, el amplificador de bajo ruido (LNA) se ha configurado en 31 dB para mejorar la ganancia de la señal de entrada, mientras que el amplificador de ganancia variable (VGA) se ajusta a 60 dB, proporcionando un control fino de la amplitud sin sobresaturar el receptor.

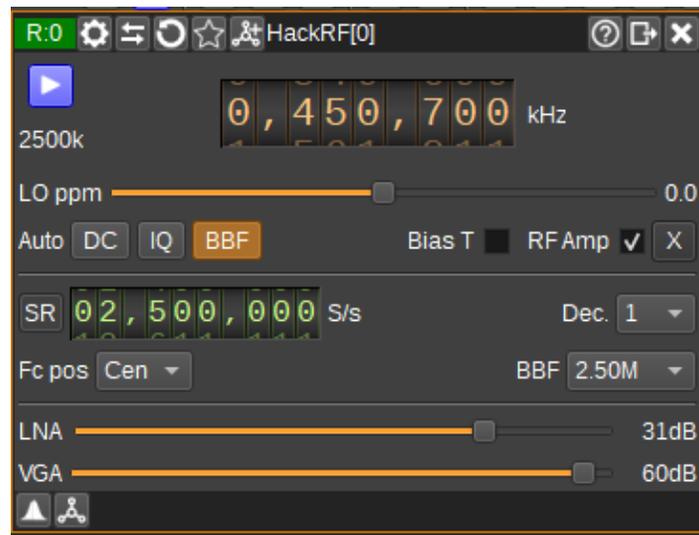


Ilustración 32. Configuración para Práctica 2 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción

Fuente: autor

- **Transmisión, AM Modulator** (Ilustración 33): el ancho de banda de radiofrecuencia (RFBW) se configura en 25 kHz para definir la señal de transmisión dentro de un rango adecuado, así se optimiza el uso del espectro en la banda; además, el porcentaje de modulación (Mod%) se establece en 95% para controlar la profundidad de la modulación de amplitud, asegurando una transmisión clara y estable sin demasiada distorsión.

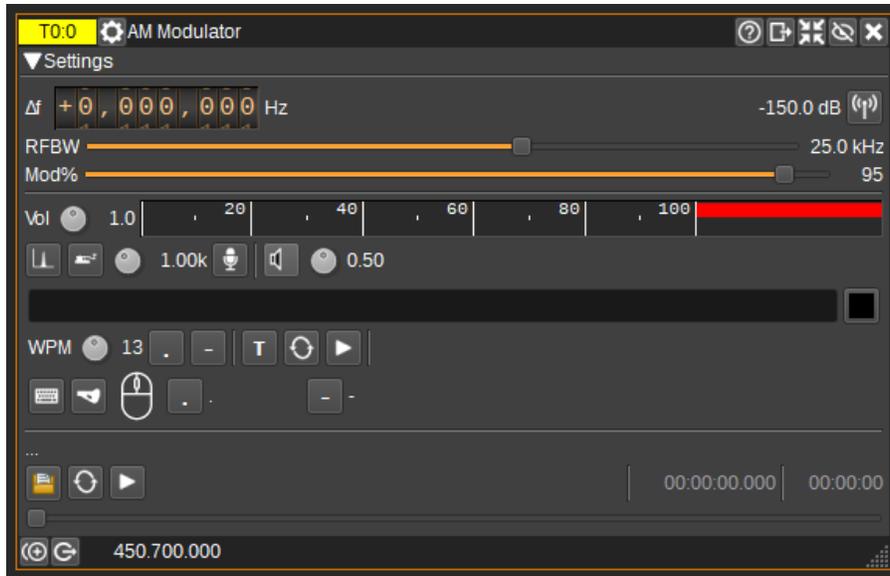


Ilustración 33. Configuración para Práctica 2 de complemento ‘AM Modulator’ en SDRAngel: transmisión

Fuente: autor

- **Recepción, AM Demodulator** (Ilustración 34): en cuanto al ancho de banda, en radiofrecuencia (RF BW) se coloca a 25 kHz porque así se capta únicamente la señal relevante dentro del rango de transmisión, mientras que el de audio (AF BW) se establece en 1.7 kHz para optimizar la claridad del audio recibido; el volumen de salida se configura en 9 para obtener un nivel de audio adecuado sin saturación, además, el nivel de silenciamiento (Sq) se fija en -100 dB, lo cual permite filtrar el ruido de fondo y activar el audio solo cuando la señal recibida supera este umbral.

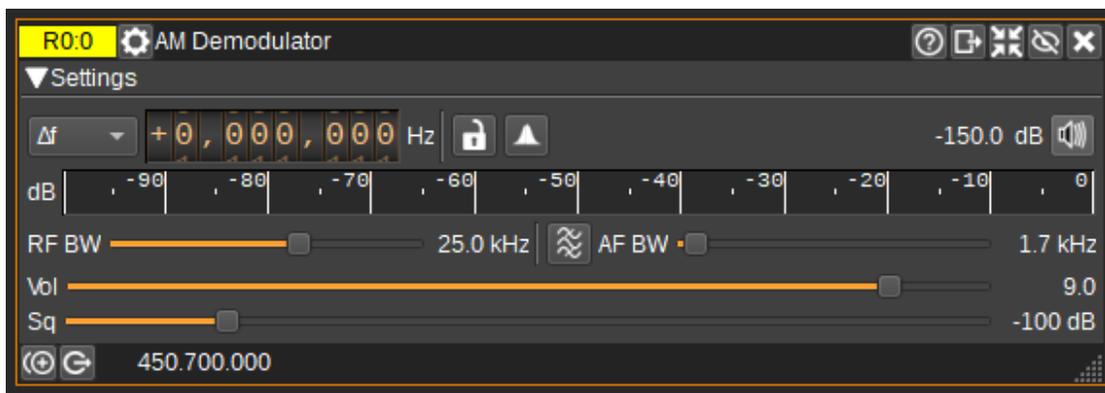


Ilustración 34. Configuración para Práctica 2 de complemento ‘AM Demodulator’ en SDRAngel: recepción

Fuente: autor

2.3.3. Parámetros de configuración para modulación QPSK: Práctica 3:

Implementar la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) para transmitir y recibir señales por Televisión Digital Amateur (DATV), y analizar el espectro y el Diagrama de Constelación en tiempo real en base a los parámetros de ajuste realizados.

A continuación, se mencionan las configuraciones de los complementos de SDRAngel que se utilizan en la práctica:

- **Transmisión, HackRF** (Ilustración 35): se configura a una frecuencia de 500 MHz. Se aplica un ajuste de compensación de oscilador local (LO ppm) de 3.0 para corregir posibles desviaciones de frecuencia. El amplificador de RF (RF Amp) está activado para mejorar la potencia de transmisión. Además, el filtro de paso de banda (BBF) se ajusta a 1.75 MHz para mantener la señal en el rango adecuado de frecuencia. La tasa de muestreo (SR) se configura en 3 MS/s, lo que permite una buena resolución y calidad en la señal digital. El amplificador de ganancia variable (VGA) está ajustado a 43 dB, optimizando la amplitud de la señal transmitida para asegurar una recepción clara y estable en el dispositivo receptor.

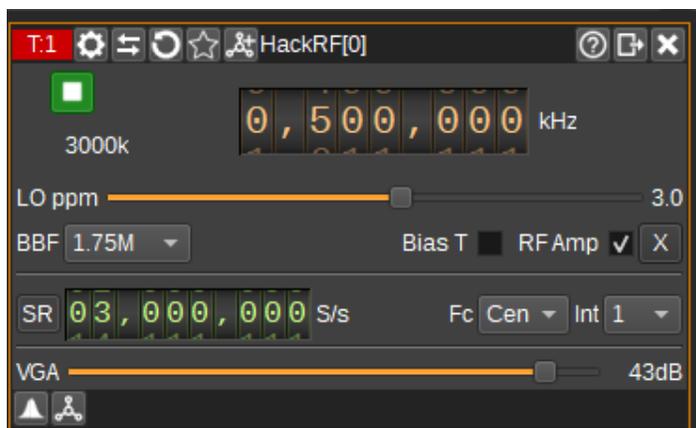


Ilustración 35. Configuración para Práctica 3 de complemento 'HackRF' en SDRAngel: transmisión.

Fuente: autor

- **Recepción, HackRF** (Ilustración 36): se utiliza la frecuencia de 500 MHz; la tasa de muestreo se ajusta a 2.9 MS/s, lo cual permite capturar una señal detallada, el BBF se establece en 2.5 MHz para minimizar la interferencia de otras señales; el amplificador de bajo ruido (LNA) se configura en 40 dB para mejorar la sensibilidad de recepción al amplificar las señales de baja potencia, y el amplificador de ganancia variable (VGA) se ajusta a 36 dB para garantizar una recepción clara y de alta calidad en el sistema.

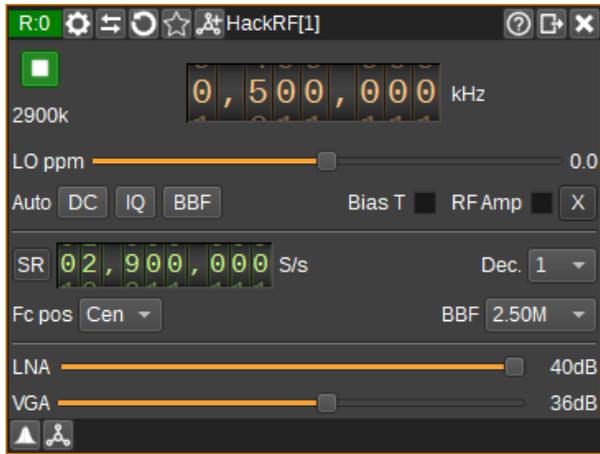


Ilustración 36. Configuración para Práctica 3 de complemento ‘HackRF’ en SDRAngel: recepción

Fuente: autor

- **Transmisión, DATV Modulator** (Ilustración 37): se configura a una tasa de símbolos de 500 ksps, lo que define la velocidad de transmisión; el ancho de banda (BW) se ajusta a 1 MHz, optimizando el espectro; el estándar de modulación se establece como DVB-S, lo que garantiza que la señal sea compatible, la fuente de la señal se configura para ser un archivo, lo que permite la transmisión de datos previamente almacenados, el código de corrección de errores (FEC) se ajusta a $\frac{1}{2}$, lo que indica un equilibrio entre la eficiencia de transmisión y la capacidad de corrección de errores, y la modulación se establece como QPSK.

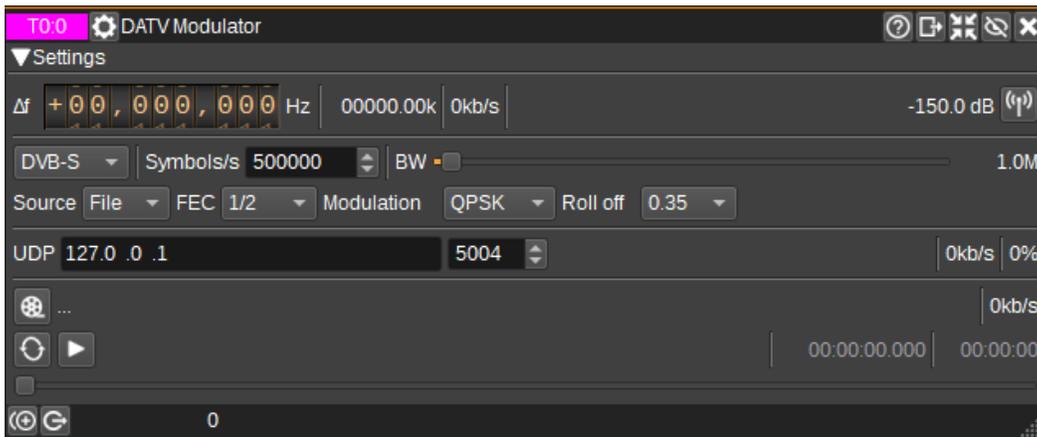


Ilustración 37. Configuración para Práctica 3 de complemento ‘DATV Modulator’ en SDRAngel: transmisión.

Fuente: autor

- **Recepción, DATV Demodulator** (Ilustración 38): el ancho de banda (BW) se establece en 1 MHz para captar eficientemente la señal, mientras que el estándar DVB-S y la modulación

QPSK aseguran la compatibilidad con transmisiones de televisión digital por satélite. El FEC se configura a $\frac{1}{2}$, proporcionando un balance entre la eficiencia de la transmisión y la corrección de errores. La tasa de símbolos se ajusta a 500,000 símbolos por segundo (500 kps), alineándose con la tasa de transmisión. Además, se activan las opciones Allow Drift, que compensa pequeñas desviaciones en la frecuencia de la señal durante la recepción, mejorando la estabilidad, mientras que Hard Metric endurece la constelación, optimizando la precisión en la demodulación y reduciendo los errores de bit. El filtro FIR Nearest mejora la calidad de la señal al reducir interferencias y mantener una demodulación precisa.

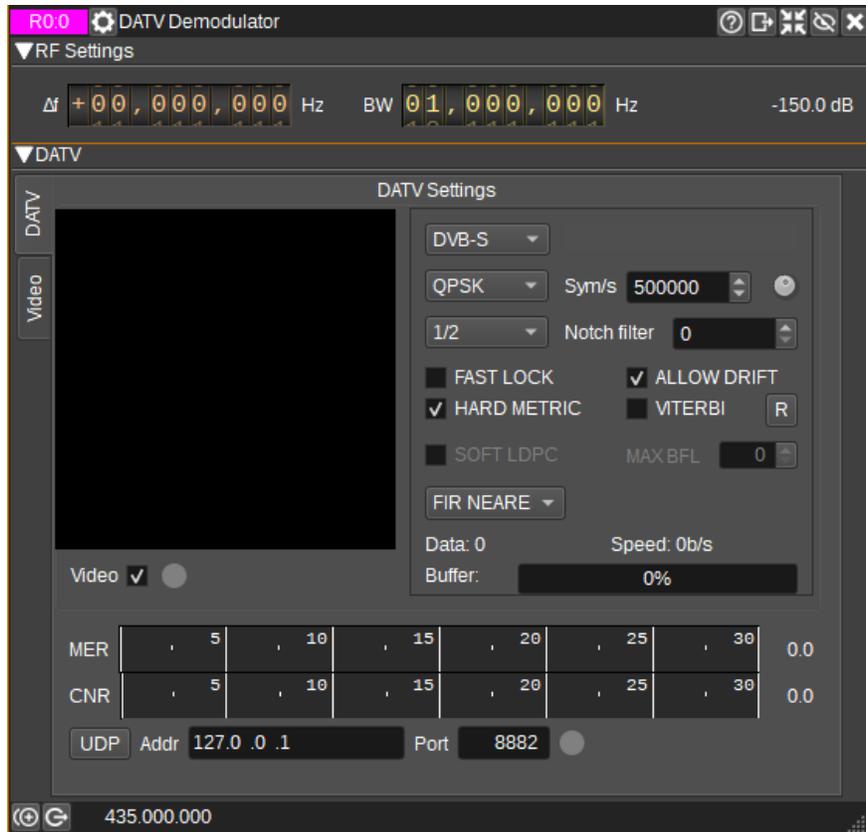


Ilustración 38. Configuración para Práctica 3 de complemento ‘DATV Demodulator’ en SDRAngel: recepción.

Fuente: autor

CAPITULO III

3.1. Ejecución de los experimentos

A continuación, se realiza la ejecución de los experimentos de manera detallada:

3.1.1. Preparación del entorno de pruebas

3.1.1.1. Interconexión del hardware

Para la práctica 1 y 2 se utilizan dos ordenadores (o laptops), es decir, PCs, por ende, dos dispositivos HackRF One (incluyendo su antena) y cables USB-MICRO C, ya que un sistema se es usado para recepción y otro para transmisión, por lo tanto, el diagrama de conexiones de manera general termina siendo de la siguiente manera como se muestra en la Ilustración 39:

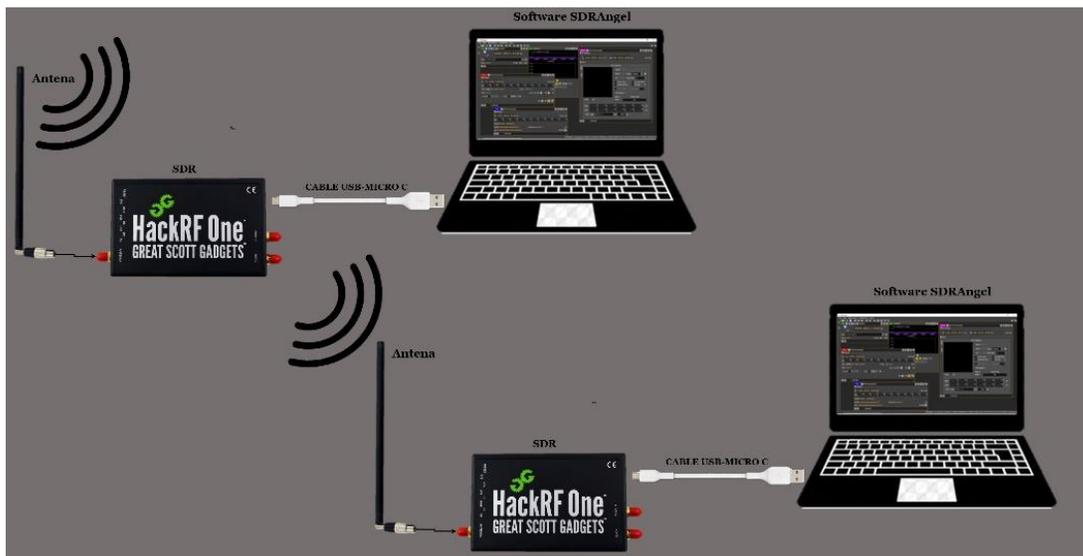


Ilustración 39. Diagrama de conexiones del sistema SDR para práctica 1.

Fuente: autor

Para la práctica 3 se utiliza una sola PC, pero si dos dispositivos HackRF One (incluyendo su antena) y cables USB-MICRO C, ya que un sistema se es usado para recepción y otro para transmisión, por lo tanto, el diagrama de conexiones de manera general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 40):

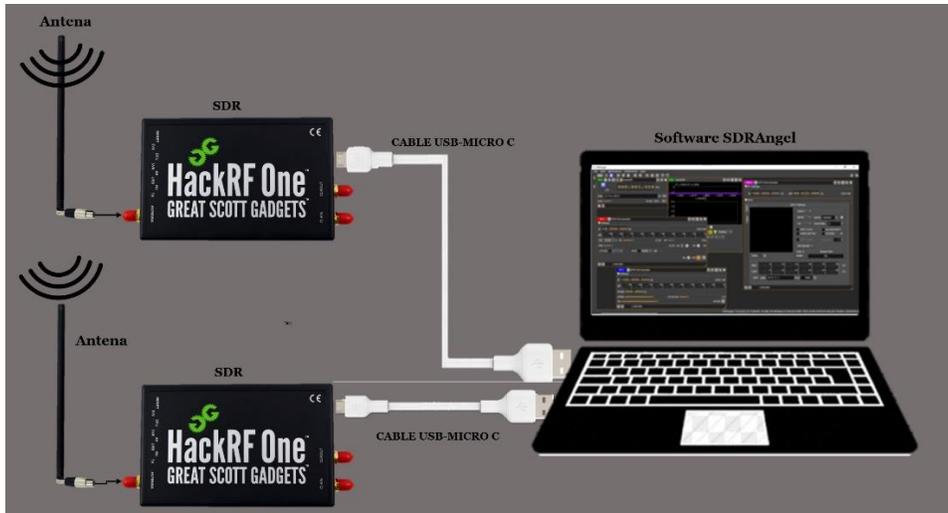


Ilustración 40. Diagrama de conexiones del sistema SDR para práctica 3.

Fuente: autor

Cuando se realicen las conexiones, si en el HackRF One se enciendan los leds correspondientes a ‘3V3’, ‘1V8’, ‘RF’ y ‘USB’ tal y como se enseña en la Ilustración 41, entonces, quiere decir que se lograron las conexiones de manera exitosa respecto al hardware.



Ilustración 41. Conexión exitosa de hardware HackRF One

Fuente: autor

3.1.1.2. SDRAngel: apertura del software y creación de espacio de trabajo

Dentro del ordenador (o laptop) se busca el ícono del software SDRAngel  en el escritorio, de no encontrarla, copie y pegue la siguiente dirección en el explorador de archivos “C:\Program Files\SDRangel”, y ejecute la aplicación “sdrangel.exe”.

Ahora, para crear un nuevo espacio de trabajo diríjase a *Workspace* y de clic en *New*, luego aparecerán nuevas ventanas para operar en el espacio de trabajo, véase Ilustración 42:

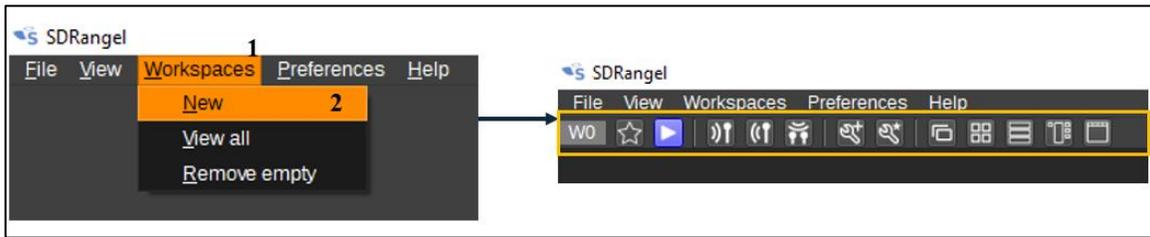


Ilustración 42. Nuevo espacio de trabajo en SDRAngel.

Fuente: autor

3.1.1.3. Formato de archivo para transmisión DATV

El formato para la transmisión en DATV es **.ts**, es un estándar en la transmisión de datos de audio y video digital, este formato permite dividir y empaquetar la información en segmentos pequeños, lo cual es ideal para transmisiones en tiempo real y redes inestables, ya que permite que los datos perdidos o dañados no afecten seriamente la calidad de la transmisión en su conjunto [44].

Con un archivo de extensión **.mp4**, es posible convertirlo al formato requerido (**.ts**), siga los pasos que se presentan a continuación:

Paso 1: escoja algún video (.mp4) de su directorio o descargue un video de YouTube desde algún servidor seguro (YTD, ClipGrab, JDownloader, VLC Media Player, etc), se recomienda que no dure más de 2 minutos.

Paso 2: luego diríjase al siguiente enlace: <https://convertio.co/es/mp4-ts/>, en la Ilustración 43 se observa la interfaz de esta página de conversión:



Ilustración 43. Interfaz de conversor de archivos Convertio

Fuente: autor

Paso 3: cargue el archivo, escójalos del explorador de archivos (o arrástrelo desde ‘Descargas’), una vez cargado debe aparecer de la siguiente manera (véase Ilustración 44), como se mencionó anteriormente, se recomienda que el video no dure más de 2 minutos, lo que significa que el peso del archivo también debe ser lo más pequeño posible.

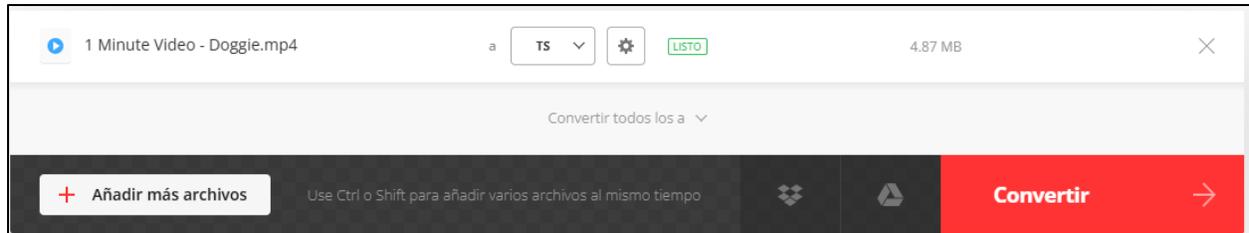


Ilustración 44. Carga de archivo .mp4 para convertir a .ts

Fuente: autor

Paso 4: de click en convertir, debe esperar unos 5-10 segundos aproximadamente, esto varía dependiendo del tamaño del archivo a convertir

Paso 5: finalmente descargue el archivo multimedia con extensión .ts, en la Ilustración 45 se observa la interfaz final de este proceso

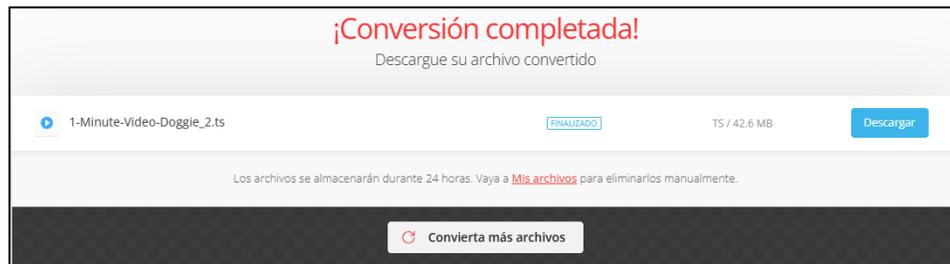


Ilustración 45. Descarga de archivo convertido a .ts

Fuente: autor

3.1.2. Práctica 1: transmisión y recepción de señales NFM

Paso 1: se guía de la Ilustración 31 para realizar las conexiones correspondientes a la práctica 1, de tal forma que se ve la siguiente manera (véase Ilustración 46):



Ilustración 46. Conexiones del hardware de práctica 1

Fuente: autor

Paso 2: luego ejecute el programa SDRAngel y cree un espacio de trabajo (sección 3.1.1.2), primero se configura el transmisor (Tx), se dirige al ícono  para agregar un dispositivo Tx, en la Ilustración 47 se aprecian los dispositivos de transmisión, de no aparecer, actualice el listado, luego que aparezca, le da clic a **HackRF[0]’ número de serie’**, después aparecerán las respectivas interfaces para HackRF, en la parte superior izquierda debe aparecer  lo que significa que el dispositivo se encuentra como transceptor, véase Ilustración 48:

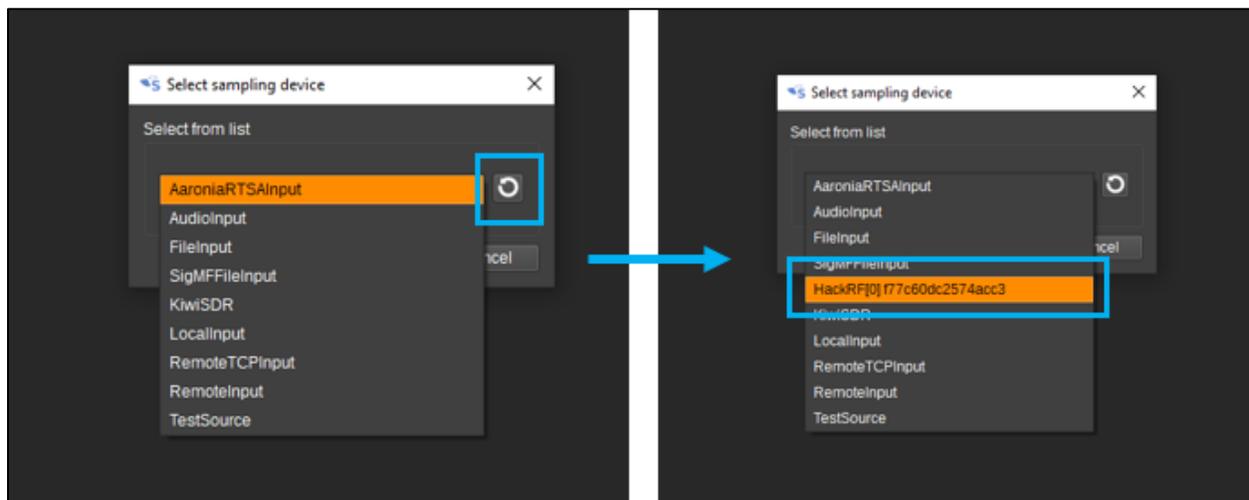


Ilustración 47. Agregar dispositivo HackRF de transmisión en SDRAngel.

Fuente: autor

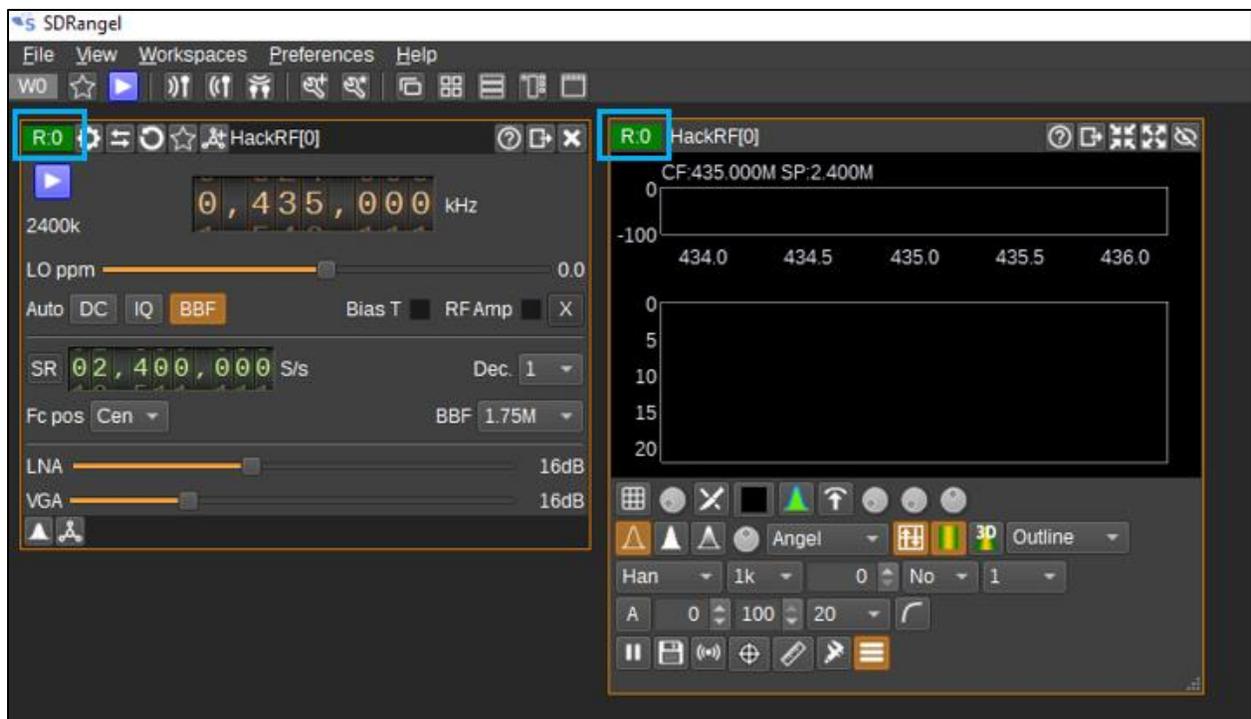


Ilustración 48. Interfaz de HackRF como receptor en SDRangel.

Fuente: autor

Paso 5: una vez abiertas las interfaces del dispositivo HackRF, en la parte superior se pueden encontrar varios íconos, le da clic al ícono  para agregar canales, en donde aparecerá la ventana mostrada en la Ilustración 49, una vez abierta esta ventana, entre todas las opciones seleccione *NFM Modulator*, luego clic en *Aplicar* para agregar la nueva interfaz del canal al espacio de trabajo.

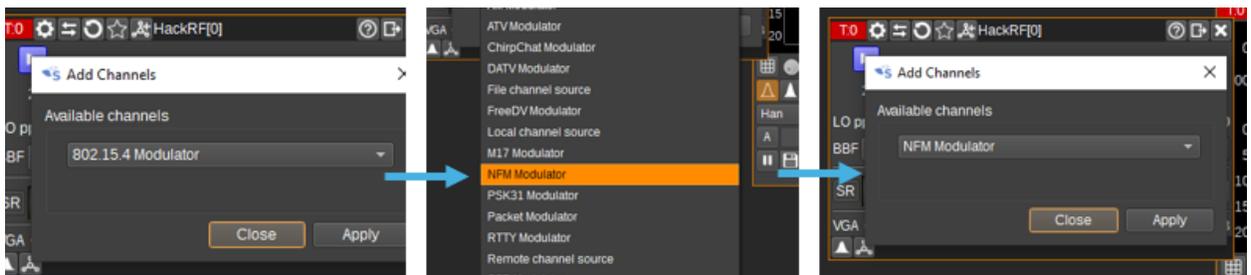


Ilustración 49. Agregar canal *NFM Modulator* para transmisión para HackRF en SDRangel.

Fuente: autor

Paso 6: se realizan las configuraciones de cada interfaz, tales se encuentran de manera detallada en las ilustraciones 27 y 29, para *HackRF* y *NFM Modulator* respectivamente, el espacio de trabajo en general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 50):

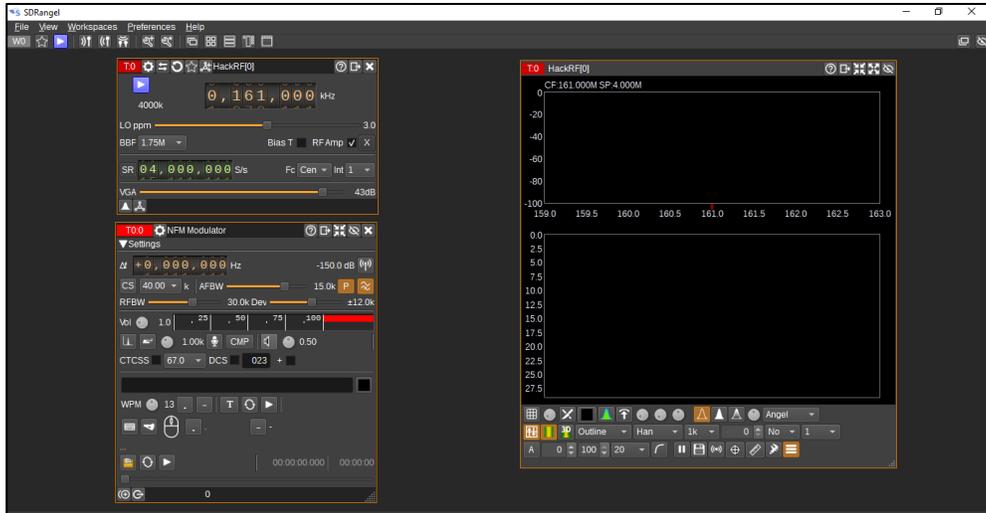


Ilustración 50. Configuración de transmisión en NFM en SDRAngel, práctica 1.

Fuente: autor

Paso 7: ya teniendo la transmisión (Tx), ahora se configura la recepción (Rx), en la otra PC ejecute el programa de SDRAngel, cree un nuevo espacio de trabajo tal y como en los pasos anteriores, en este caso proceda a seleccionar el ícono  para agregar un dispositivo de recepción y seleccione el dispositivo HackRF[0]'número de serie', véase la Ilustración 51.

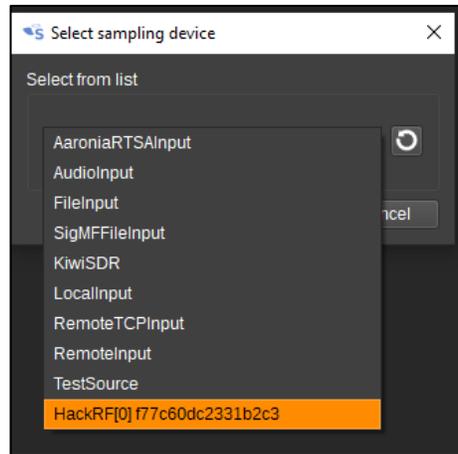


Ilustración 51. Dispositivos de transmisión en SDRAngel.

Fuente: autor

Paso 8: al igual que en el paso 5, una vez abierta la interfaz de HackRF, de clic en el ícono  para agregar un canal, entre todas las opciones seleccione *NFM Demodulator*, y agregue al espacio de trabajo como se muestra en la Ilustración 52

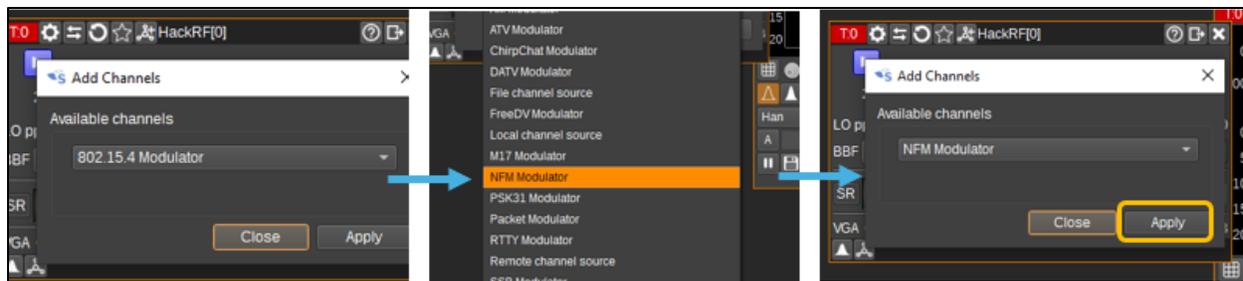


Ilustración 52. Agregar canal *NFM Demodulator* para recepción para HackRF en SDRAngel.

Fuente: autor

Paso 9: se realizan las configuraciones de cada interfaz (en este caso para recepción), tales se encuentran de manera detallada en las ilustraciones 28 y 30, para *HackRF* y *NFM Demodulator* respectivamente, el espacio de trabajo en general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 38):

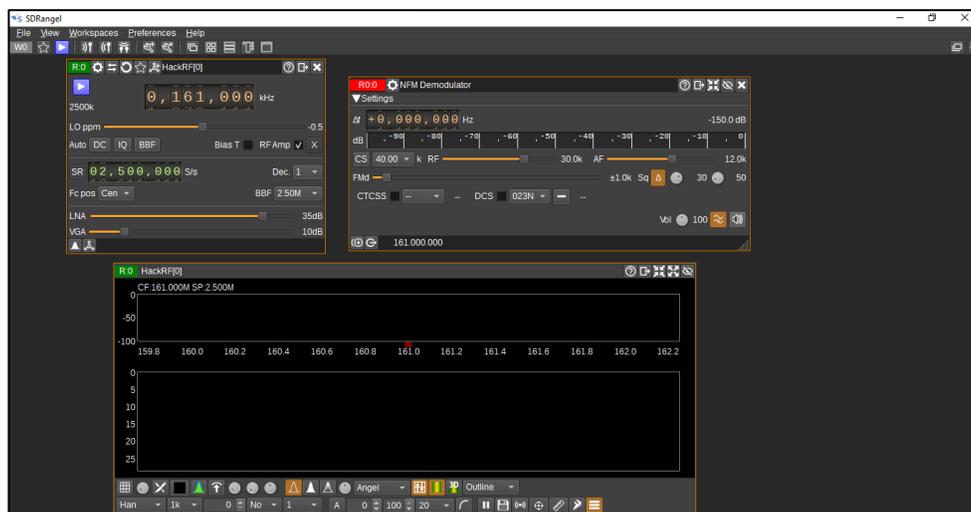


Ilustración 53. Configuración de recepción en NFM en SDRAngel, práctica 1.

Fuente: autor

Paso 10: tome una distancia de aproximadamente 50 m entre ambos sistemas SDR, después, en el transmisor de HackRF empiece presionando el botón de 'Iniciar generación', véase Ilustración 54



Ilustración 54. Generación de señal NFM

Fuente: autor

Paso 11: en 'NFM Modulator' (Tx) primero en la barra de texto CW escriba una palabra o frase, y active los botones en el orden que se enseñan en la Ilustración 55, la 5ta opción es opcional, es solo si el usuario desea escuchar la señal CW generada:



Ilustración 55. NFM Modulator: configuración de CW

Fuente: autor

Paso 12: observe como la señal se genera exitosamente, puede cambiar el tamaño de las interfaces, también observar la señal de transmisión en 3D, observe la Ilustración 56

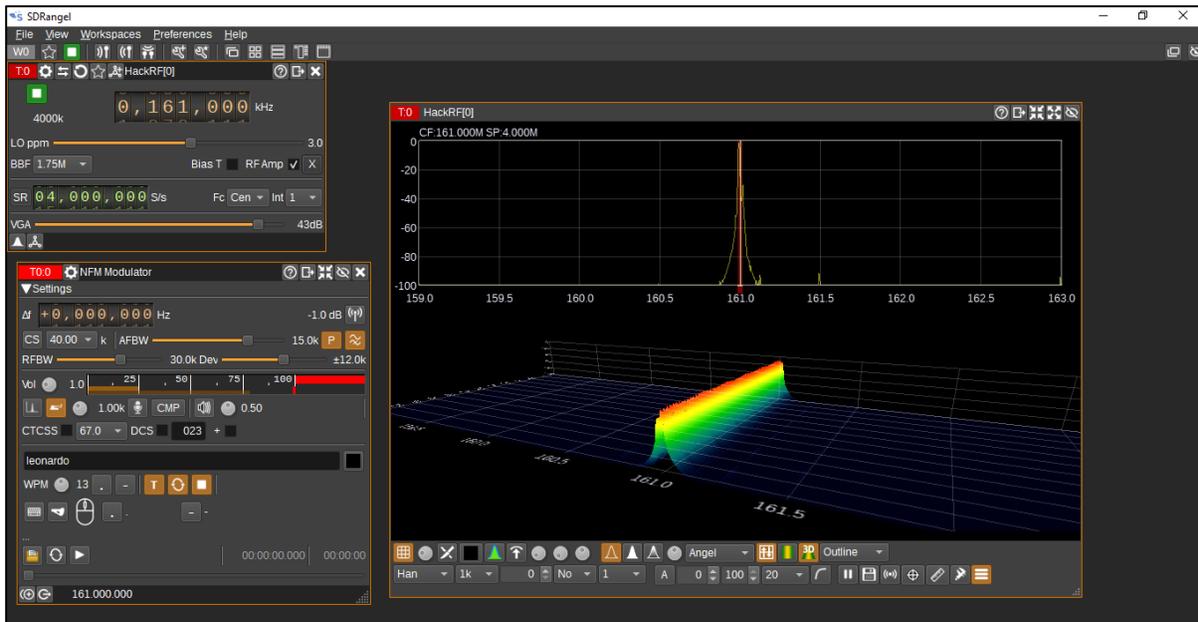


Ilustración 56. Transmisión exitosa de señal utilizando modulación NFM en SDRAngel

Fuente: autor

Paso 13: en el receptor HackRF (Rx), active  para empezar a recibir la señal CW generada por el transmisor, puede observar y escuchar como la señal llega exitosamente, al igual que las interfaces de transmisión, en las de recepción también puede cambiar el tamaño de los complementos, ver la señal en 3D y activar la cuadrícula como guía para una mejor visión de las señales, véase la Ilustración 57:

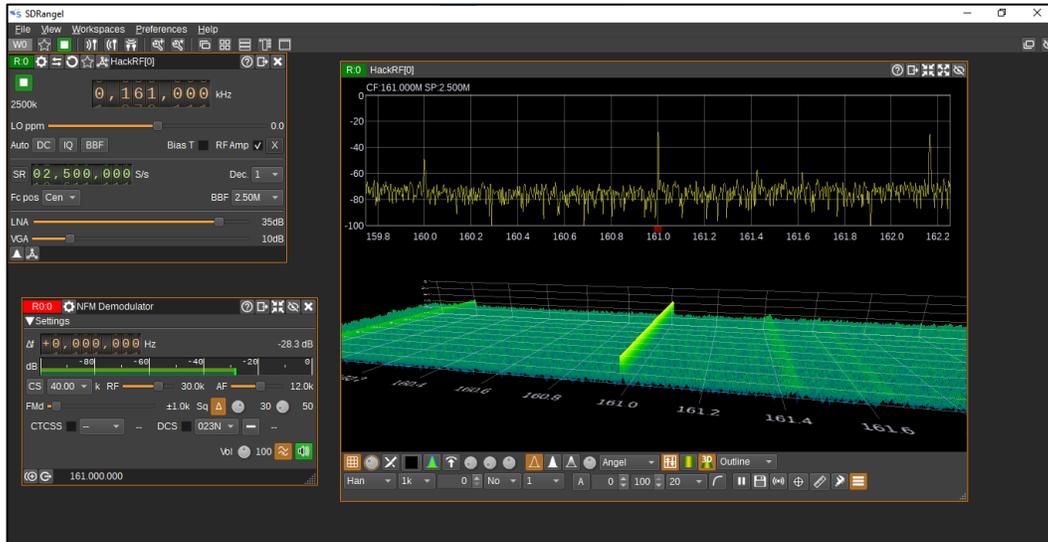


Ilustración 57. Recepción exitosa de señal utilizando modulación NFM utilizando SDRAngel

Fuente: autor

3.1.3. Práctica 2: transmisión y recepción de señales AM

Paso 1: guíese de la Ilustración 31 para realizar las conexiones correspondientes a la práctica 2, de tal forma que se ve la siguiente manera (véase Ilustración 58):



Ilustración 58. Conexiones de hardware para práctica 2

Fuente: autor

Paso 2: en una Pc ejecute el programa SDRAngel y cree un espacio de trabajo (sección 3.1.1.2), y siguiendo algunos los pasos de la práctica anterior, primero se crea las interfaces de la transmisión (Tx), agregue el dispositivo *HackRF* al espacio de trabajo con  luego con  agregue el canal *AM Modulator*, la interfaz en general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 59):

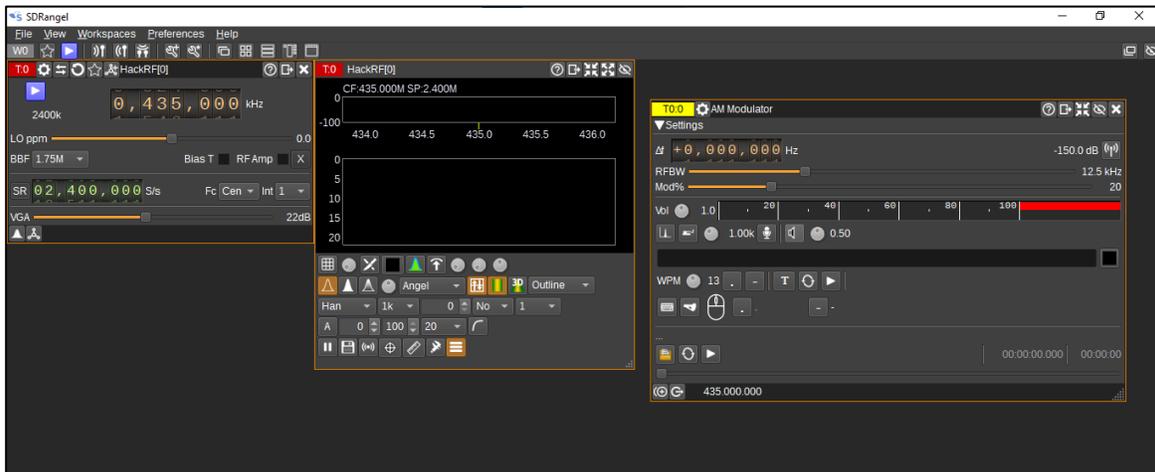


Ilustración 59. Interfaces de transmisión para modulación AM en SDRAngel, práctica 2

Fuente: autor

Paso 3: se realizan las configuraciones de transmisión de cada interfaz, tales se encuentran de manera detallada en las ilustraciones 31 y 33, para *HackRF* y *AM Modulator* respectivamente, el espacio de trabajo en general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 60):

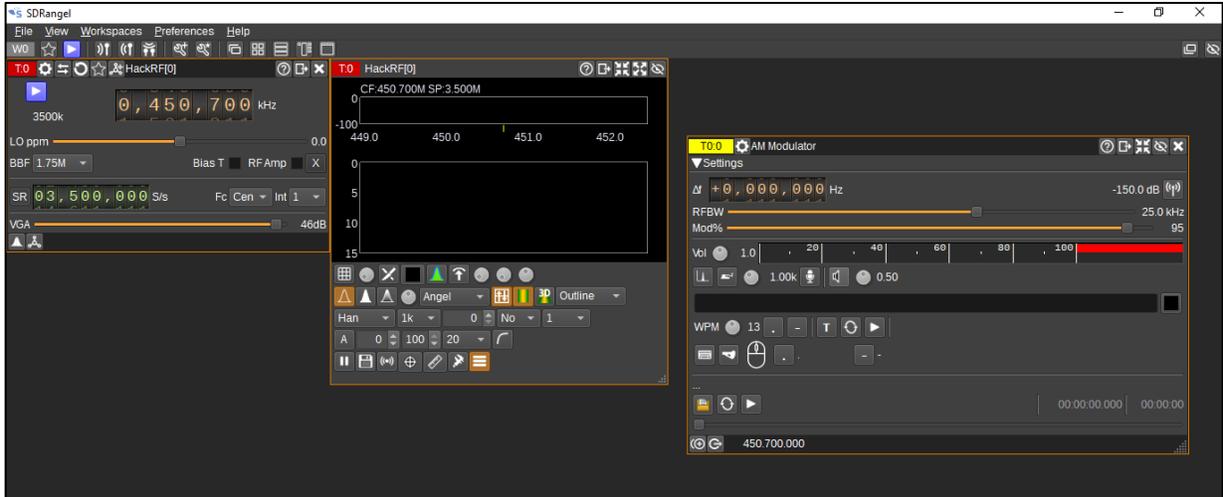


Ilustración 60. Configuración de transmisión en AM de práctica 2

Fuente: autor

Paso 4: por consiguiente, se configura la recepción (Rx), en la otra PC ejecute el programa de SDRangel, cree un nuevo espacio de trabajo, agregue a *HackRF* como dispositivo de recepción con  posteriormente agregue el canal *AM Demodulator*, tal que las interfaces en general se visualizan como en la Ilustración 61

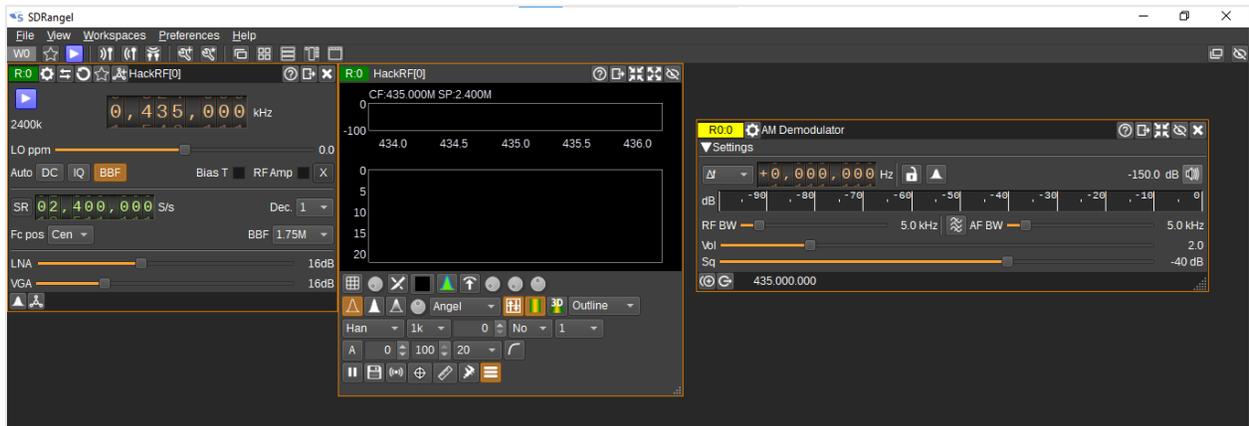


Ilustración 61. Complementos de recepción de práctica 2

Fuente: autor

Paso 5: se realizan las configuraciones de recepción de cada interfaz, tales se encuentran de manera detallada en las ilustraciones 32 y 34, para *HackRF* y *AM Demodulator* respectivamente, puede cambiar el tamaño de las interfaces, el espacio de trabajo en general queda de la siguiente manera (véase Ilustración 62):

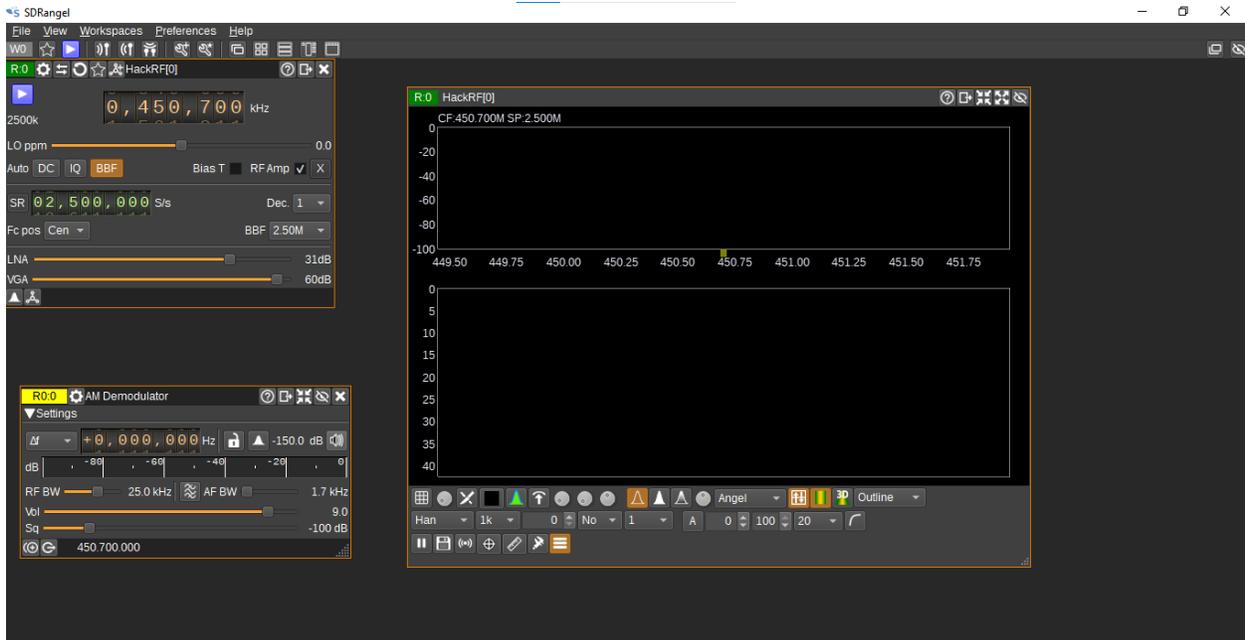


Ilustración 62. Configuración de interfaces de recepción de práctica 2

Fuente: autor

Paso 6: tome una distancia de aproximadamente 25 m entre ambos sistemas SDR, después, en el transmisor de HackRF empiece presionando el botón de ‘Iniciar generación’, posteriormente en ‘AM Modulator’ (Tx), active el micrófono y empiece a hablar para generar las señales de voz

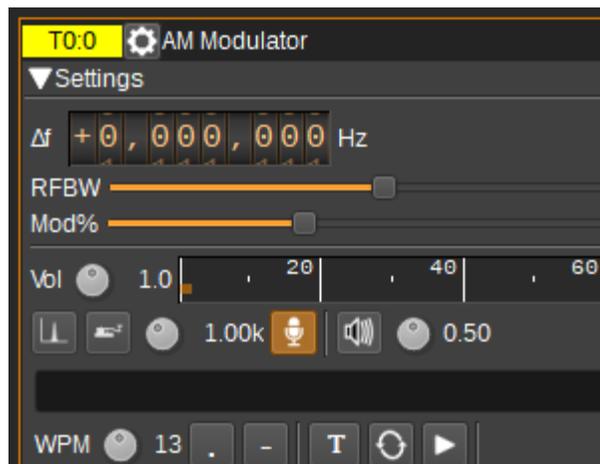


Ilustración 63. AM Modulator: activación de micrófono

Fuente: autor

Paso 7: observe como la señal se genera exitosamente, también observar la señal de transmisión en 3D, observe la Ilustración 64

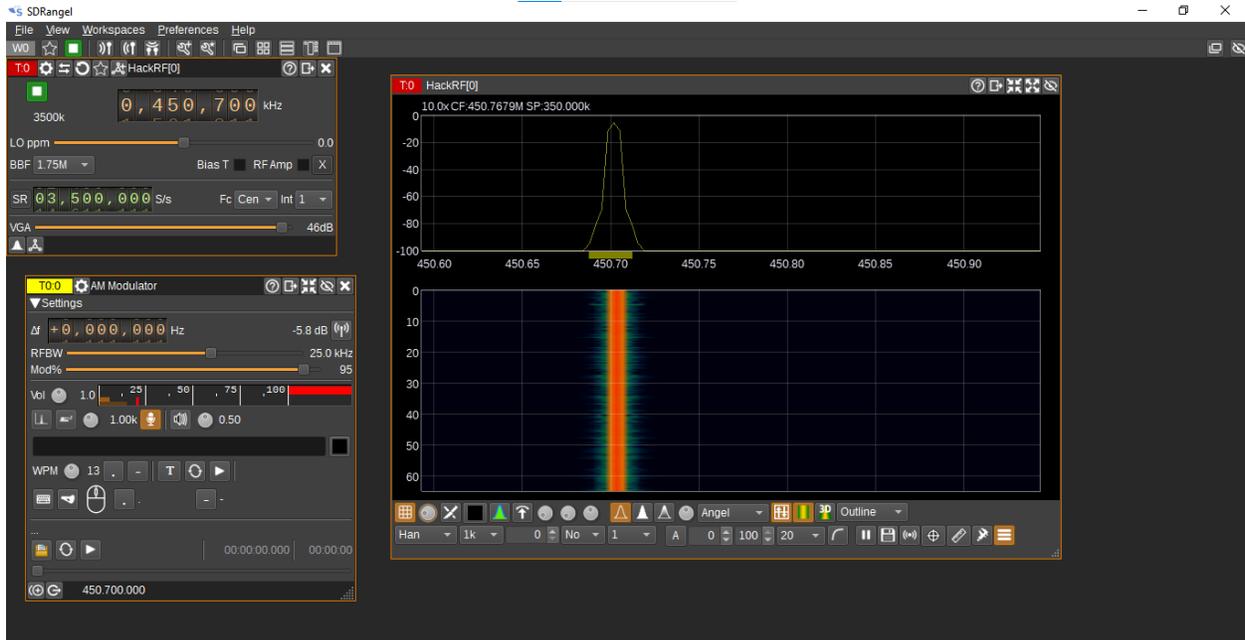


Ilustración 64. Transmisión exitosa de señal de voz en tiempo real utilizando modulación AM

Fuente: autor

Paso 8: en el receptor HackRF (Rx), active  para empezar a recibir la señal CW generada por el transmisor, puede observar y escuchar como la señal llega exitosamente, al igual que las interfaces de transmisión, en las de recepción también puede cambiar el tamaño de los complementos y ver la señal en 3D, véase la Ilustración 65:

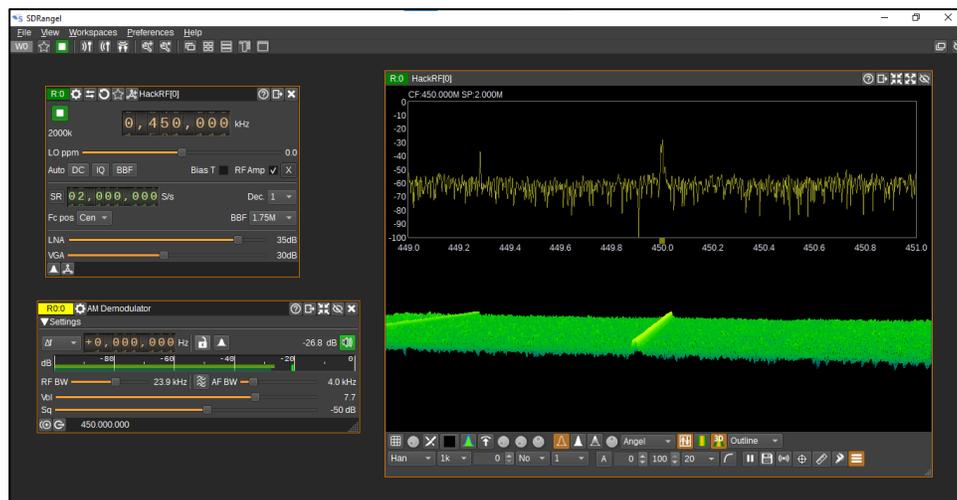


Ilustración 65. Recepción exitosa de señal de voz en tiempo real utilizando modulación AM

Fuente: autor

3.1.4. Práctica 3: transmisión y recepción de señales QPSK

Paso 1: se conectan los dispositivos tal y como se muestra en la Ilustración 40, en esta práctica se utilizan ambos HackRF One en un mismo ordenador, deje al menos un espacio de aproximadamente 20 cm entre ambos dispositivos HackRF one, de manera física las conexiones quedan de la siguiente forma, véase Ilustración 66.



Ilustración 66. Conexiones físicas de dispositivos HackRF One para práctica 2.

Fuente: autor

Paso 2: ejecute el programa SDRAngel y cree un espacio de trabajo (sección 3.1.1.2), luego agregue como transmisor uno de los dos dispositivos HackRF, seguidamente agregue el canal DATV Modulator del mismo, véase Ilustración 67

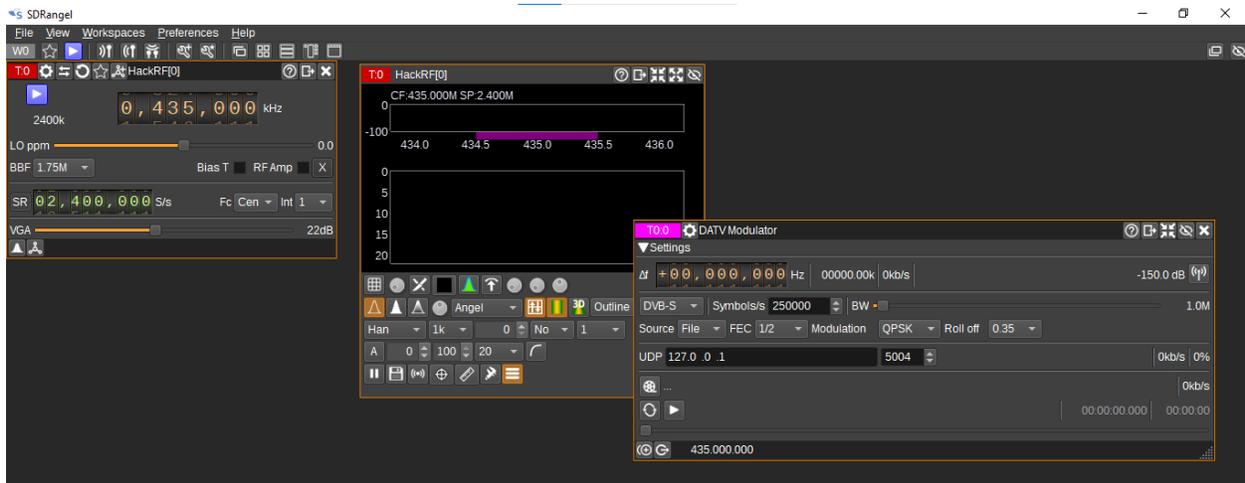


Ilustración 67. Complementos de transmisión de la práctica 3

Fuente: autor

Paso 3: en el mismo espacio de trabajo, agregue los complementos de recepción, HackRF como receptor y DATV Demodulator, al momento de seleccionar el dispositivo *HackRF* solo se le mostrará uno, es decir, el que NO está en uso, y posteriormente agregue el canal *DATV Demodulator*, asegúrese de acomodar todos los complementos (Tx y Rx) en la misma ventana, de tal manera que se pueda visibilizar todas las configuraciones posibles, tome como guía la Ilustración 68

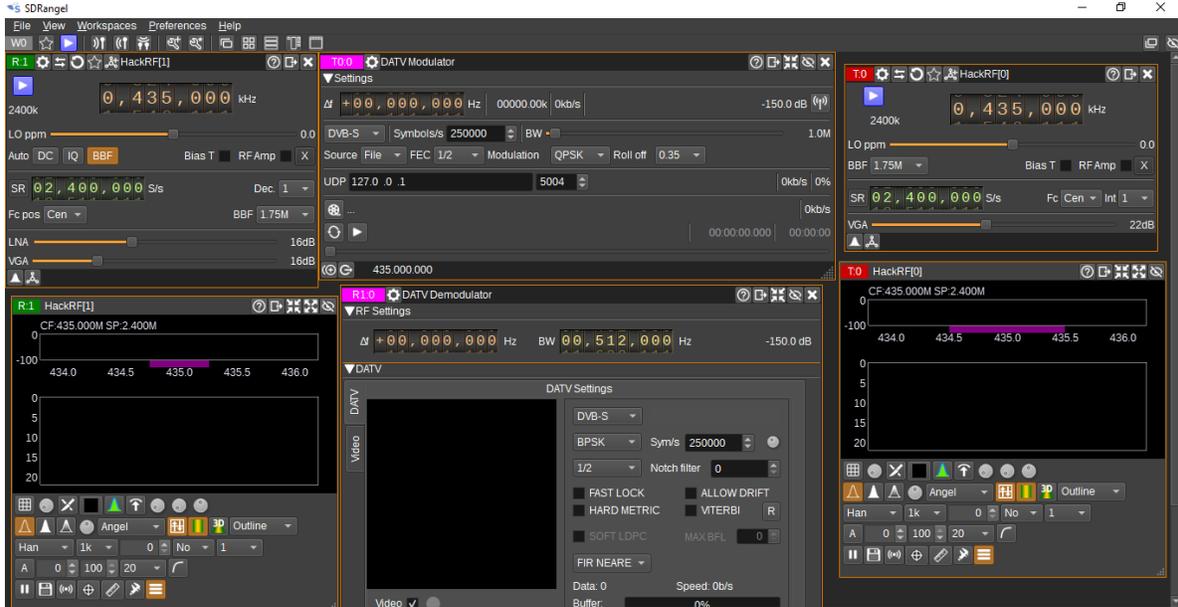


Ilustración 68. Complementos de transmisión y recepción de práctica 3

Fuente: autor

Paso 4: configure los parámetros en los complementos de transmisión, la Ilustración 35 e Ilustración 37 corresponden a *HackRF* (Tx) y *DATV Modulator*, en la Ilustración 69 se enseña el espacio de trabajo

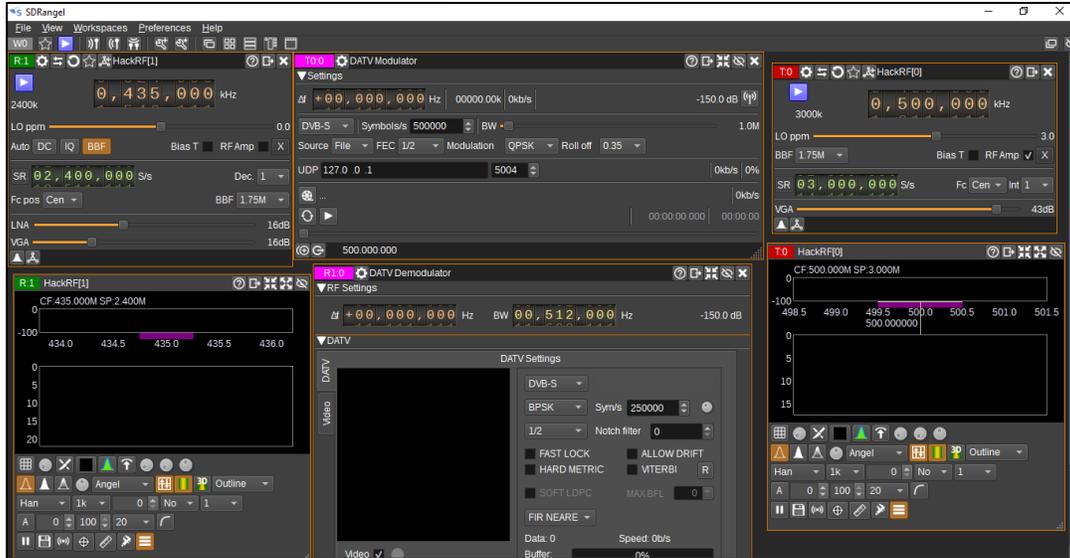


Ilustración 69. Configuración de parámetros de transmisión de práctica 3

Fuente: autor

Paso 8: configure los parámetros en los complementos de recepción, la Ilustración 36 e Ilustración 38 corresponden a *HackRF* (Rx) y *DATV Demodulator*; en la Ilustración 70 se muestra el espacio de trabajo

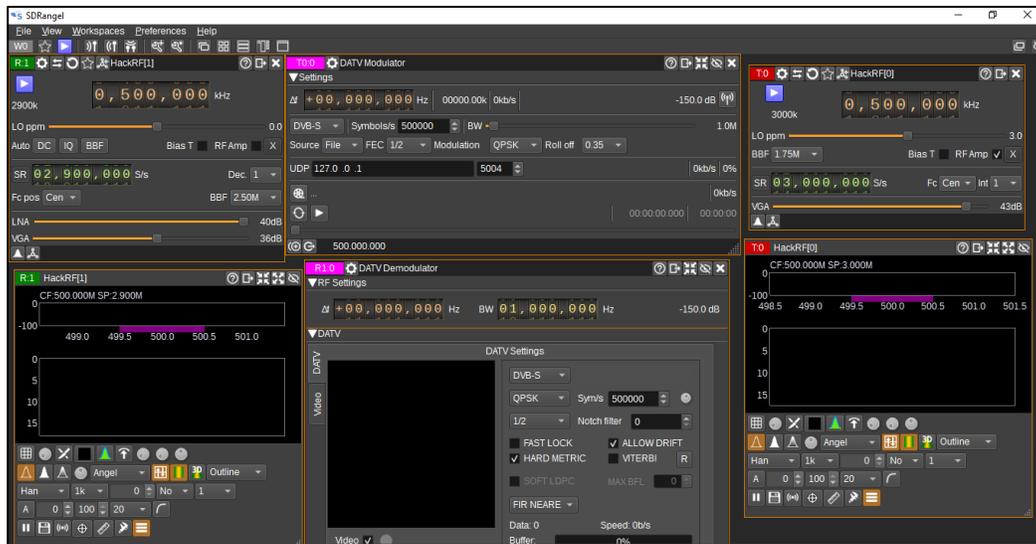


Ilustración 70. Configuración de parámetros de recepción de práctica 3

Fuente: autor

Paso 9: diríjase a *DATV Modulator* y cargue un archivo .ts (véase sección 3.1.1.3 para obtener un archivo con este formato), (1) de clic en el botón ‘Selección de archivo de flujo de

transporte’, luego se abrirá un cuadro de diálogo que le permitirá elegir un archivo de flujo de transporte con formato .ts, ya que haya elegido el archivo requerido, (3) de clic en abrir, (4) el nombre del archivo aparecerá en el espacio a la derecha del botón, este proceso se refleja en la Ilustración 71

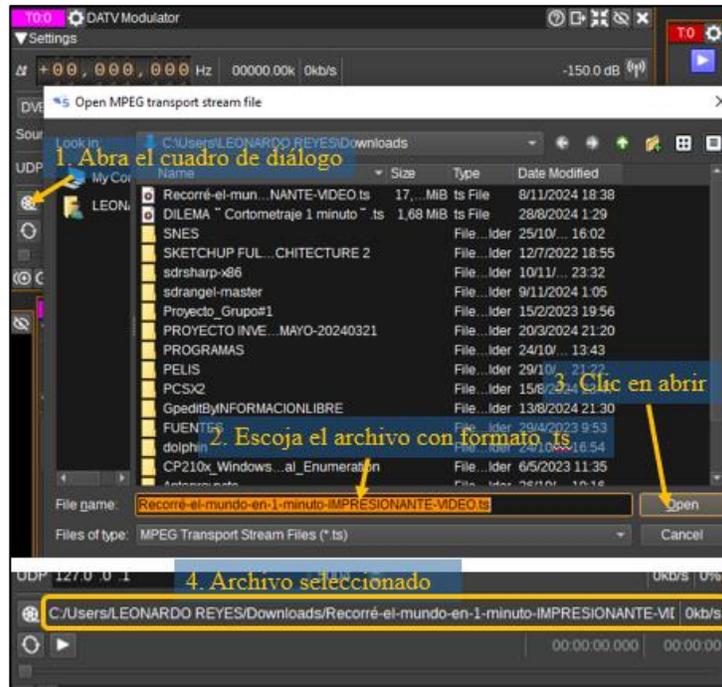


Ilustración 71. Proceso de carga de archivo con formato compatible para DATV Modulator

Fuente: autor

Paso 10: de clic en ‘iniciar’ en ambos complementos *HackRF*, transmisión y recepción, observe la ilustración 72

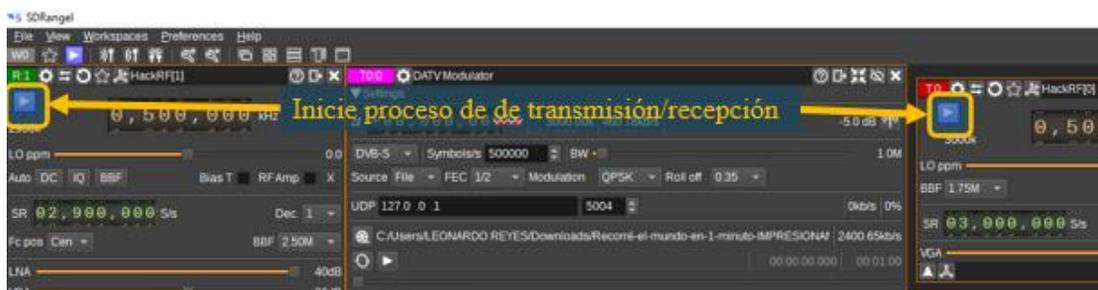


Ilustración 72. Inicio de transmisión y recepción de señal utilizando DATV por medio de modulación QPSK

Fuente: autor

Paso 11: observe como la recepción en el monitor de DATV en *DATV Demodulator* empieza a recibir la señal, observe como automáticamente se forme el diagrama de constelación datos, véase Ilustración 73

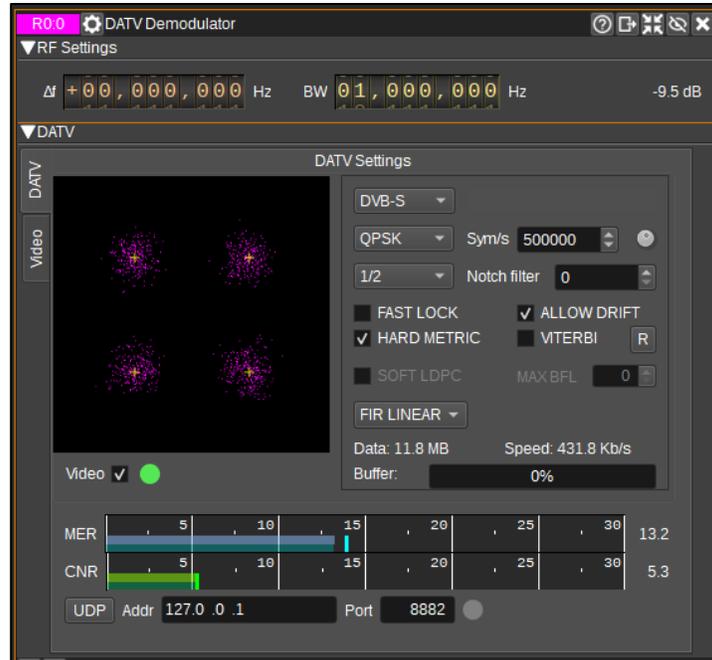


Ilustración 73. Diagrama de constelación para QPSK en SDRAngel, complemento DATV

Fuente: autor

Paso 12: para ver el video modulado, dirijase a *DATV Modulator*, y reproduzca el archivo cargado, adicional a aquello puede repetir el video de manera infinita, véase Ilustración 74

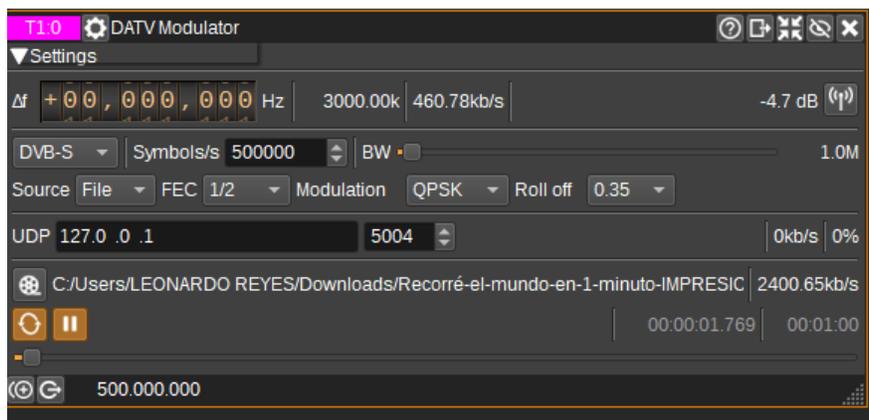


Ilustración 74. Reproducción de video cargado con formato .ts en DATV

Fuente: autor

Paso 13: diríjase a *DATV Demodulator* y seleccione el monitor de ‘video’, podrá observar el video reproducirse, además de encontrar detalles de la recepción el parte inferior de este apartado, véase Ilustración 75



Ilustración 75. Reproducción de video recibido en DATV utilizando modulación QPSK

Fuente: autor

Paso 14: el espacio de trabajo en general se ve de la siguiente forma (véase Ilustración 76)

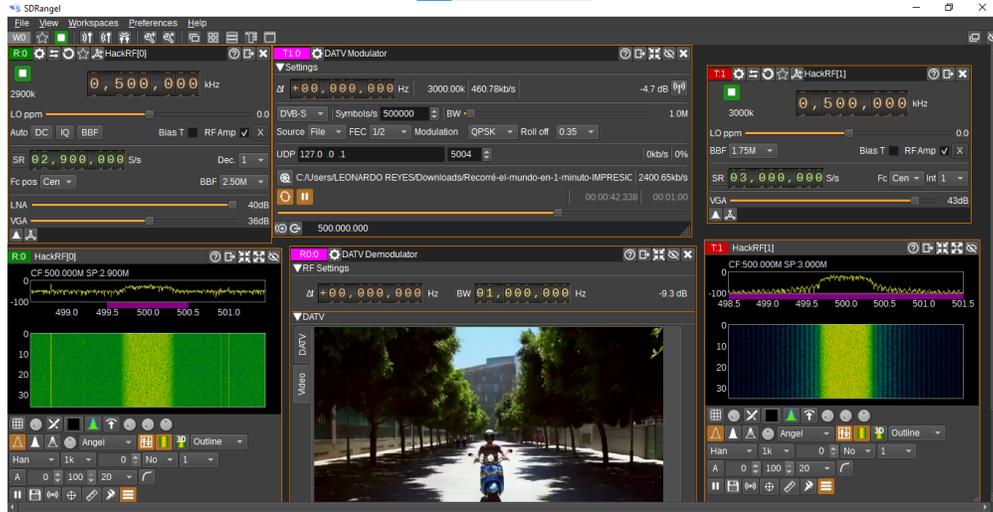


Ilustración 76. Transmisión y recepción exitosa de señal utilizando DATV por medio de modulación QPSK en SDRangel

Fuente: autor

3.1.5. Análisis de resultados

3.1.5.1. Análisis Práctica 1: transmisión y recepción de señales NFM

En la Ilustración 77 se aprecian algunos datos sobre la potencia del canal, en este caso de transmisión con modulación NFM, en ese instante de tiempo la señal se encuentra en 0.31 dB, lo cual se considera una señal fuerte, al igual que la potencia promedio de -0.85 dB; la potencia mínima se registra en -40.27 dB y la máxima en 1.10 dB, lo cual da como resultado un rango total de 41.37 dB; por otro lado, se indica una desviación estándar de 5.38 dB, lo que representa una señal relativamente consistente.

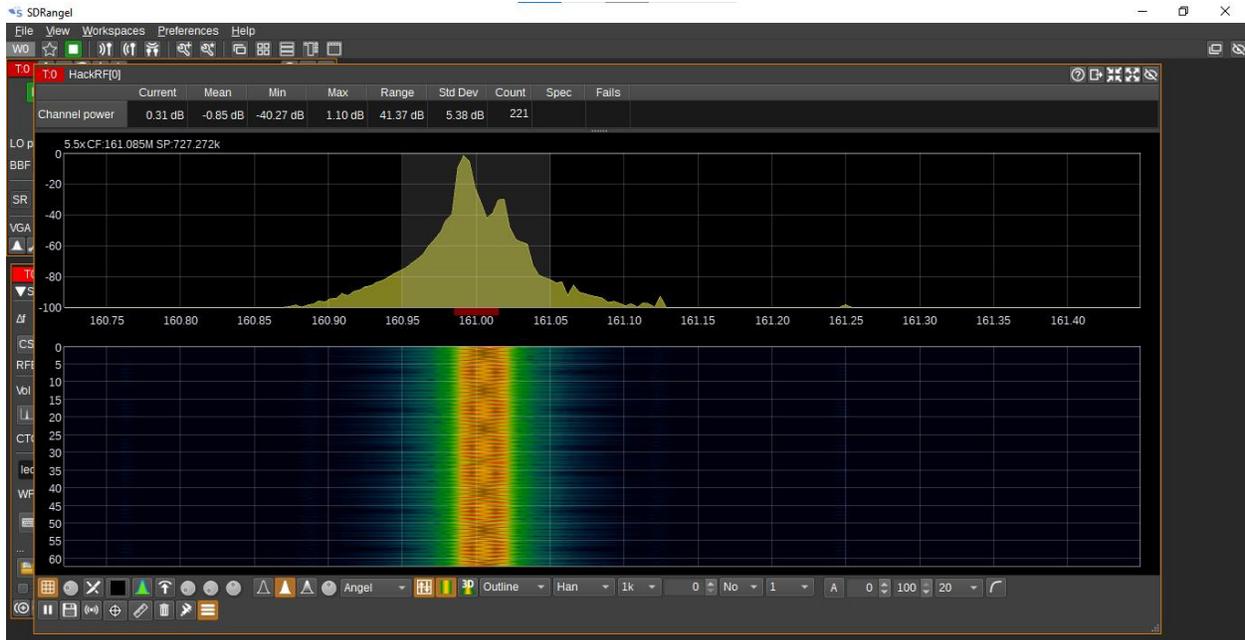


Ilustración 77. Espectro de transmisión de señal de práctica 1: NFM

Fuente: autor

En la Ilustración 78 se pueden observar datos sobre la potencia del canal de recepción con modulación NFM, en ese instante de tiempo la señal se encuentra en -26.66 dB, lo cual se considera una débil, la potencia promedio de -23.45 dB es baja; la potencia mínima se registra en -63.37 dB y la máxima en -2.92 dB, lo cual da como resultado un rango total de 60.45 dB; por otro lado, se indica una desviación estándar de 6.98 dB, lo que representa una gran variabilidad en la potencia transmitida con comportamiento moderado.



Ilustración 78. Espectro de recepción de señal de práctica 1: NFM

Fuente: autor

3.1.5.2. Práctica 2: transmisión y recepción de señales AM

En la Ilustración 79 se observan datos sobre la potencia del canal de transmisión en modulación AM, en ese instante de tiempo la señal se encuentra en -4.6 dB, lo cual se considera una óptima para transmitir, la potencia promedio de -20 dB es baja; la potencia mínima registrada es de -150 dB y la máxima en -2.3 dB, lo cual da como resultado un rango total de 147.7 dB; por otro lado, se indica una desviación estándar de 43.3 dB, lo que representa una gran variabilidad en la potencia transmitida en donde existen inconsistencias

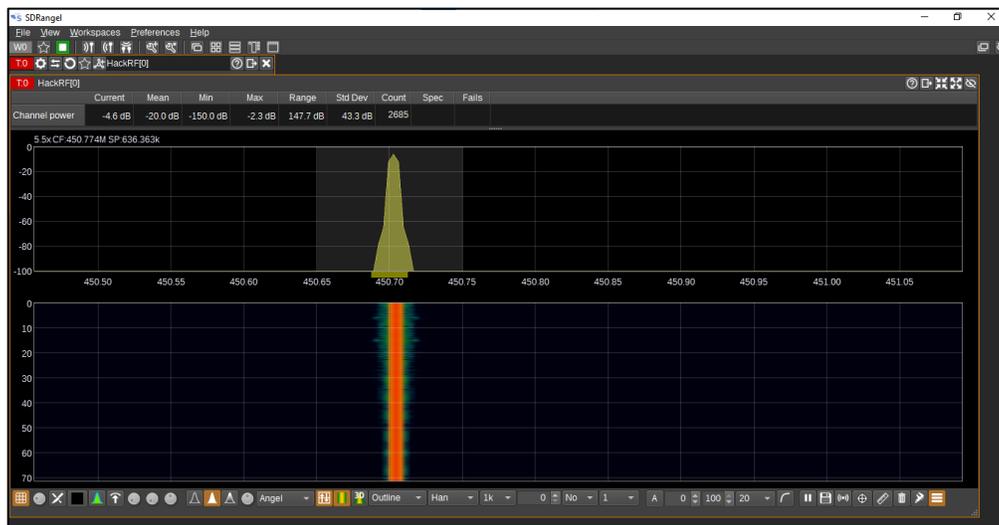


Ilustración 79. Espectro de transmisión de señal de práctica 2: AM

Fuente: autor

En la Ilustración 80 se muestran datos sobre la potencia del canal de recepción en modulación AM, en ese momento la señal está en -9.92 dB, la cual se considera algo baja, la potencia promedio de -12.73 dB es aceptable; la potencia mínima se registra en -31.38 dB y la máxima en -2.92 dB, que da un rango total de 28.46 dB; se indica una desviación estándar de 5.12 dB, lo que representa un rango razonable de estabilidad.

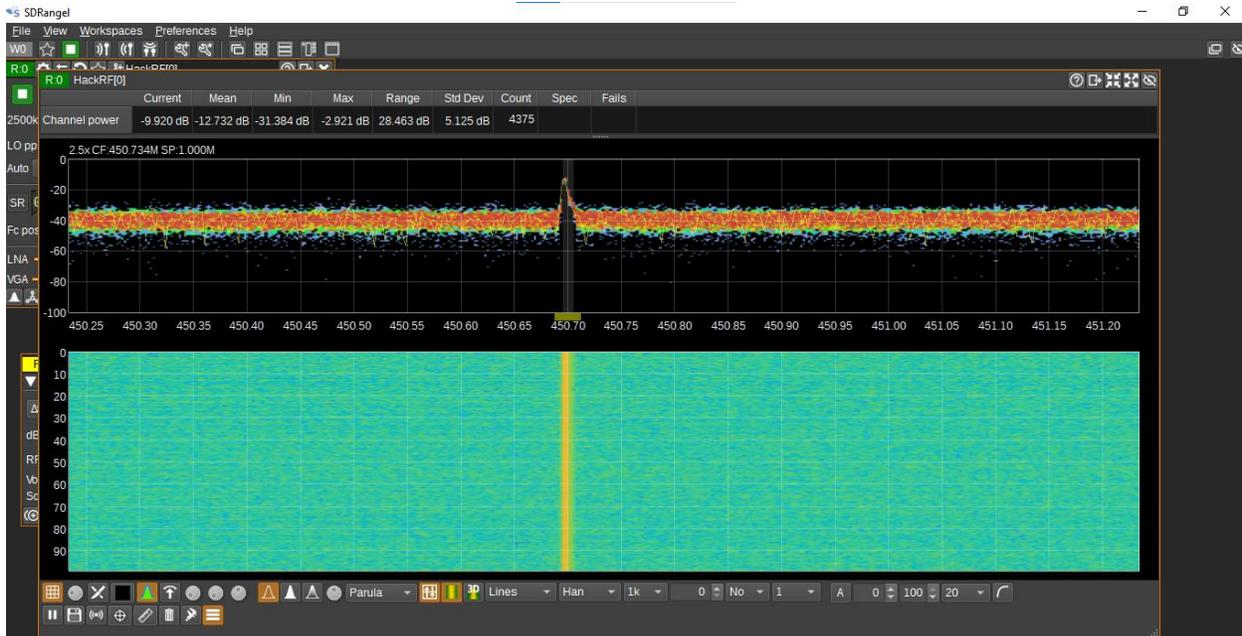


Ilustración 80. Espectro de recepción de señal de práctica 2: AM

Fuente: autor

3.1.5.3. Práctica 3: transmisión y recepción de señales QPSK

En la Ilustración 81 se enseñan datos sobre la potencia del canal de recepción y transmisión con modulación QPSK:

Recepción (izquierda): en ese momento la señal está en -2.78 dB, la cual se considera baja, la potencia promedio de -2.97 dB es apto en la recepción; la potencia mínima registrada es de -3.4 dB y la máxima en -2.63 dB, que da un rango total de 0.78 dB; se indica una desviación estándar de 0.13 dB, lo que representa un rango de estabilidad muy grande.

Transmisión (derecha): en ese instante de tiempo la señal se encuentra en -3.02 dB, la cual se considera una señal aceptable, la potencia promedio de -3.01 dB es aceptable; la potencia mínima se registra en -3.03 dB y la máxima en -2.99 dB, que da un rango total de 0.04 dB; se indica una desviación estándar de 0.01 dB, lo que significa que la señal es muy estable.

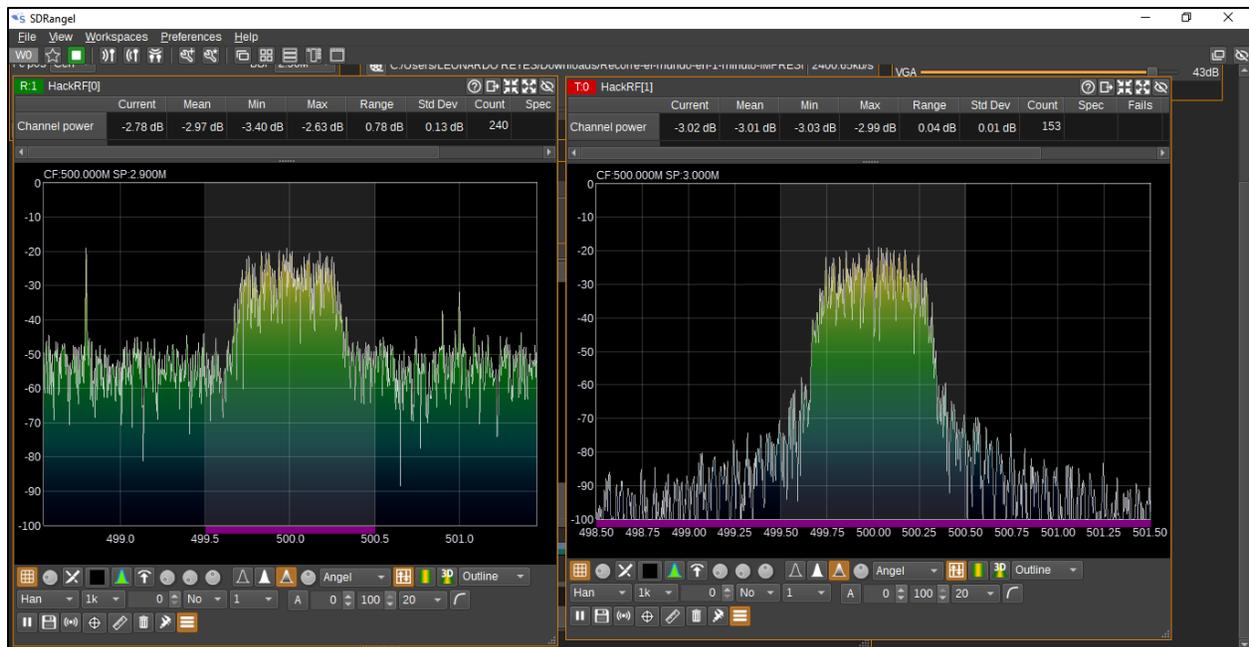


Ilustración 81. Espectro estilo gradiente de recepción y transmisión de señal de práctica 3: QPSK

Fuente: autor

En la Ilustración 82, se presenta el Diagrama de Constelación de modulación QPSK, se observa un funcionamiento estable del sistema en base a la recepción, esto significa que los símbolos están siendo decodificados correctamente, lo que a su vez se entiende que la transmisión está siendo efectiva.

En la misma ilustración se exponen otros parámetros, en ese instante de tiempo la cantidad de datos decodificados en el reproductor de video que corresponden a 2.3 MB y la velocidad de transmisión es de 452.3 kb/s, estos valores reflejan que el sistema está funcionando de manera eficiente, con una estabilidad de video adecuada.

Más abajo se encuentran la estimación del MER y de CNR:

Relación de error de modulación (MER): con un valor de 15.4 dB, indica que la modulación es precisa, la señal está relativamente bien alineada con los puntos ideales del diagrama de constelación.

Relación portadora-ruido (CNR): con 5.4 dB se considera un valor relativamente bajo, puede ser decodificada, sin embargo, la calidad de la imagen se verá afectada, ya que no es un valor considerable para una recepción de alta calidad.

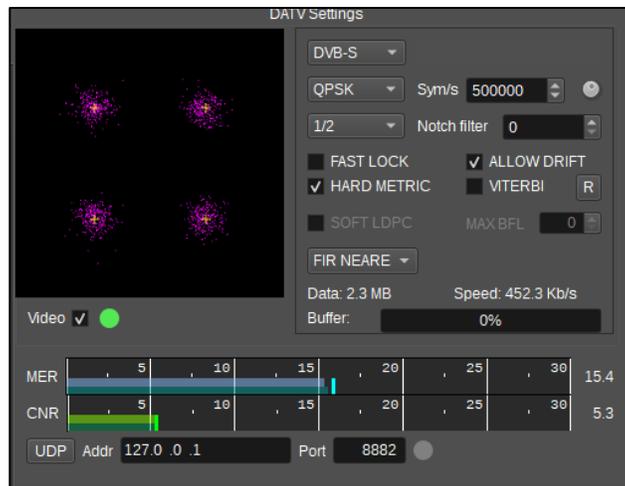


Ilustración 82. Análisis de datos de recepción en DATV

Fuente: autor

3.1.6. Evaluación del sistema

- **Indicadores de evaluación**

En el curso de la aplicación práctica, se evaluaron una serie de métricas de rendimiento del sistema con respecto a los módulos NFM, AM y QPSK. Para todas las modulaciones, la relación señal-ruido se mantuvo a niveles razonables para permitir una transmisión y recepción eficientes en las configuraciones controladas dadas. Al considerar QPSK, se evaluó el rendimiento de todo el sistema de modulación digital en términos de la frecuencia de muestreo. Se observó que se estableció una transmisión efectiva incluso en distancias muy cortas en entornos con bajas interferencias. Estos factores indican que la configuración de simulación ofrece la calidad y la confiabilidad necesarias de la señal en cada configuración; por lo tanto, se puede concluir que la configuración y las configuraciones brindan la calidad y la estabilidad de señal necesarias para cada uno de los parámetros configurados.

- **Latencia de transmisión y recepción**

Estas magnitudes bajas de latencia se logran hábilmente para garantizar que las señales se transmitan rápidamente y se reciban con precisión. Mientras que para las modulaciones de audio (NFM y AM), la latencia es realmente trivial y verdaderamente una comunicación en tiempo real sin un silencio audible, en el caso de QPSK en DATV, aunque la transmisión de video generalmente tiende a ser altamente procesada, la latencia se mantiene baja y puede transmitirse sin problemas con estabilidad con otros logros ejemplares.

- **Estabilidad de la frecuencia portadora**

La estabilidad de la frecuencia portadora se mantuvo satisfactoria en todas las prácticas, sin desviaciones sustanciales entre los modos de modulación NFM y AM, lo que garantiza una recepción estable de la señal de audio. La práctica QPSK para DATV registró cierta deriva de frecuencia, rectificada en SDRAngel mediante funciones de compensación de frecuencia; una de estas opciones era "Permitir deriva". Esto indica que el sistema SDR proporciona efectivamente una frecuencia portadora estable en general, con capacidad para ajustarse dinámicamente bajo modulaciones digitales más exigentes.

- **Alcance máximo de transmisión y recepción**

En condiciones de prueba de grandes extensiones, la modulación NFM a 161 MHz cubrió una distancia significativa, pero tuvo una distancia efectiva de 100 metros en una superficie abierta sin obstrucciones. Por el contrario, incluso en condiciones similares, debido a la mayor atenuación de las señales UHF, la modulación AM a 450,7 MHz se limitó a solo 50 metros. Aunque la QPSK en DATV demostró ser efectiva en rangos cortos de aproximadamente un metro, la señal se perdió con bastante rapidez, lo que limitó su uso a laboratorios y otros entornos controlados. Los hallazgos resaltan la relevancia para cada aplicación SDR de los requisitos de distancia y estabilidad de la señal al considerar la selección adecuada de frecuencia y modulación.

3.1.7. Conclusiones

- La configuración y el diseño de los entornos de simulación basado en la tecnología SDR por medio de HackRF One y SDRAngel fueron claves para entender las modulaciones NFM, AM y QPSK, durante este proceso se combinaron la utilización del hardware y software, de esta manera se logró que trabajen en conjunto; fue necesario ajustar cuidadosamente los parámetros para cada tipo de modulación, lo que permitió analizar sus diferencias de forma clara, además, estos entornos sirvieron no solo para aprender, sino también para experimentar de forma práctica con las comunicaciones. De esta manera se creó una base, ideal para fines educativos y experimentales.
- Al realizar estos experimentos de transmisión y recepción, fue posible observar cómo funcionan en la práctica las modulaciones NFM, AM y QPSK; los resultados mostraron cómo influyen factores como la calidad de la señal y las condiciones del entorno en las transmisiones, esto permitió no solo confirmar teorías, sino también descubrir los retos que implican estos procesos en la vida real, aunque algunas configuraciones fueron más intuitivas que otras, en general, los experimentos fueron exitosos.
- Las guías elaboradas para estudiantes y docentes lograron explicar de forma clara el uso de HackRF One y SDRAngel, se crearon pensando en facilitar el aprendizaje paso a paso, incluyen ejemplos prácticos, además de recomendaciones para evitar errores

comunes, esto hace que las guías sean útiles no solo para estudiantes o docentes, sino también para quienes estén interesados en buscar profundizar en el tema; con este material, los usuarios tienen una herramienta que les permitirá entender y aplicar las modulaciones mencionadas con confianza.

3.1.8. Recomendaciones

Para comprender de mejor manera prácticas futuras, es recomendable realizar varios cambios en las configuraciones, como extender el rango de frecuencias y modulaciones utilizadas, haciendo uso de opciones como FM de banda ancha (WFM) y modulación de amplitud en cuadratura QAM, lo cual permitirá explorar una variedad de escenarios y usos de SDR. Además, se sugiere implementar pruebas en entornos reales, fuera del laboratorio, para observar los efectos de obstáculos y condiciones externas en la calidad de la señal, incorporar métricas de evaluación adicionales proporcionará una evaluación más completa del sistema; también sería beneficioso probar diferentes ajustes de ganancia y ancho de banda en los filtros, para optimizar el rendimiento de acuerdo a el entorno y la modulación, lo que a su vez ayudaría a los estudiantes a comprender mejor el impacto de estos parámetros en la transmisión y recepción de la señal.

Bibliografía

- [1] Cárdenas Nathaly, “Las Telecomunicaciones marcan el avance tecnológico global”. Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://noticias.utpl.edu.ec/las-telecomunicaciones-marcan-el-avance-tecnologico-global>
- [2] Pearson, “Ventajas del método de simulación en la educación superior”. Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.pearsonlatam.com/educacion-del-futuro/ventajas-del-metodo-de-simulacion-en-la-educacion-superior>
- [3] jtsec, “Usos comunes y puesta en marcha de una HackRF One”. Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.jtsec.es/es/entrada-blog/111/usos-comunes-y-puesta-en-marcha-de-una-hackrf-one>
- [4] Castillo Octavio, “¿Qué es Narrowband?” Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.telcel.com/empresas/tendencias/notas/que-es-narrowband>
- [5] González Lizbeth, Herrera Claudio, Iglesias Eric, y Dreyfus Carlos Arturo, “CONCEPTOS DE TELEVISION AVANZADA (ATV)”. Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos16/ingenieria-de-tv/ingenieria-de-tv>

- [6] Pini Art, “Aprenda los fundamentos de la radio definida por software”. Consultado: el 5 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/articles/learn-the-fundamentals-of-software-defined-radio>
- [7] Ríos Fernando, “LA RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)”. Consultado: el 5 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ealuro.com/sdr1/sdr.htm>
- [8] Duarte Muños Carlos, “Radio definido por software, una nueva opción en las comunicaciones espaciales”. Consultado: el 5 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=498#:~:text=Diagrama%20esquem%C3%A1tico%20de%20un%20radio,menor%20costo%20en%20el%20mercado.>
- [9] LaBateriaRecargable, “SDR”. Consultado: el 5 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://labateriarecargable.com/noticias-negocio-online/glosario/sdr/>
- [10] W. Dai y C. Ji, “Modulation Recognition System of Electromagnetic Interference Signal Based on SDR”, *Telecom*, vol. 5, núm. 3, pp. 928–940, sep. 2024, doi: 10.3390/telecom5030046.
- [11] Maldonado Cerezo Raúl, “CLASIFICADOR DE MODULACIÓN BASADO EN APRENDIZAJE AUTOMÁTICO ”, Escuela Politécnica Superior de Linares, Linares, 2022.
- [12] I. Hatai y I. Chakrabarti, “A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation”, *International Journal of Reconfigurable Computing*, vol. 2011, pp. 1–10, 2011, doi: 10.1155/2011/342532.
- [13] R. Yokoyama, K. Mizutani, T. Matsumura, H. Harada, M. Fuse, y H. Noda, “An Effective Near-Field Measurement Using Multicarrier Modulation Signal”, en *2018 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, IEEE, nov. 2018, pp. 167–172. doi: 10.1109/WPMC.2018.8713147.
- [14] A. J. PERNA GONZÁLEZ, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS DE ENTRENAMIENTO PARA FM”, PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, Cartagena, 2019.
- [15] ren raduce, “Ventajas y Desventajas de los equipos FM.” Consultado: el 5 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.renraduce.com/single-post/2014/10/14/ventajas-y-desventajas-de-los-equipos-fm>

- [16] N. Bishop, “Narrow-band F.M. for voice communication”. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/qst/1947/05/page20/index.html>
- [17] B. Sourangsu, “Analog Modulation Technique:AM”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41095-analog-modulation-technique-am>
- [18] B. Harold S. y M. Laurence B., “Amplitude modulation”, octubre de 2019. doi: 10.1036/1097-8542.030700.
- [19] M. Jain *et al.*, “Performance optimized digital QPSK modulator”, en *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, IEEE, ago. 2017, pp. 68–71. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389540.
- [20] Y. Feng, Z. Teng, F. Meng, y B. Qian, “An Accurate Modulation Recognition Method of QPSK Signal”, *Math Probl Eng*, vol. 2015, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1155/2015/516081.
- [21] Y. Ge y D. G. Daut, “Bit error rate analysis of digital communications signal demodulation using wavelet denoising”, en *34th IEEE Sarnoff Symposium*, IEEE, may 2011, pp. 1–6. doi: 10.1109/SARNOF.2011.5876447.
- [22] The Editors of Encyclopedia Britannica, “Morse Code”. Consultado: el 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/topic/Morse-Code>
- [23] Talkpod, “Unraveling the Concept of ‘Carrier’ in Radio Communications”. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://talkpod.com/blogs/two-way-radio-wiki/unraveling-the-concept-of-carrier-in-radio-communications>
- [24] novotech, “What is a Carrier Frequency and Why is it Key in GNSS/GPS Antennas?” Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://novotech.com/pages/carrier-frequency>
- [25] K. Konechy y H. Hass, “Understanding DATV RF Bandwidth for DVB-S”, 2019.
- [26] Leo Street, “DATV – DAYTON ACCESS TELEVISION”. Consultado: el 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cultureworks.org/news/passports/datv/>

- [27] “Software Defined Radio (SDR) for Hackers: Setting Up Your HackRF One”. Consultado: el 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hackers-arise.com/post/software-defined-radio-sdr-for-hackers-setting-up-your-hackrf-one>
- [28] “Great Scott Gadgets HackRF One - Receptor de señales de Radio”. Consultado: el 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Great-Scott-Gadgets-HackRF-One/dp/B01COVX464>
- [29] M. Lichtman, “PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python”. Consultado: el 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pysdr.org/content/hackrf.html>
- [30] B. Kainka, “First Experiences With HackRF One – a Review”. Consultado: el 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elektormagazine.com/review/first-experiences-with-hackrf-one-a-review>
- [31] C. V. Niño Rondón, K. C. Puerto López, D. Guevara Ibarra, y W. A. Contreras Gómez, “Radio Definida por Software: Una mirada a las tendencias y aplicaciones”, *Ingenierías USBMed*, vol. 14, núm. 1, pp. 58–69, may 2023, doi: 10.21500/20275846.6048.
- [32] Edouard Griffiths, “sdrangel”. Consultado: el 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/wiki/Quick-start>
- [33] “SDRangel”. Consultado: el 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sdrangel.org/>
- [34] Edouard Griffiths, “HackRF input plugin”. Consultado: el 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/samplesource/hackrfinput/readme.md>
- [35] Edouard Griffiths, “HackRF output plugin”.
- [36] Edouard Griffiths, “Ventana principal del espectro”.
- [37] Edouard Griffiths, “Spectrum component”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/sdrgui/gui/spectrum.md>
- [38] Edouard Griffiths, “NFM demodulator plugin”. Consultado: el 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/channelrx/demodnfm/readme.md>

- [39] Edouard Griffiths, “NFM modulator plugin”. Consultado: el 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/channeltx/modnfm/readme.md>
- [40] Edouard Griffiths, “AM demodulator plugin”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/channelrx/demodam/readme.md>
- [41] Edouard Griffiths, “AM modulator plugin”.
- [42] Edouard Griffiths, “DATV demodulator plugin”. Consultado: el 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/channelrx/demoddatv/readme.md>
- [43] Edouard Griffiths, “DATV modulator plugin”. Consultado: el 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/f4exb/sdrangel/blob/master/plugins/channeltx/moddatv/readme.md>
- [44] M. Gonzáles, “¿Qué es el Formato TS y cómo Reproducir Archivos TS?” Consultado: el 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://filmora.wondershare.es/video-editing/ts-format.html#:~:text=El%20MP4%20se%20considera%20m%C3%A1s,los%20programas%20permiten%20la%20extensi%C3%B3n%20>.