

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA PARA RADIODIFUSIÓN FM UTILIZANDO HARDWARE LIBRE EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas de control

AUTOR: Kevin Damián Durán Rojaldo

TUTOR: Ing. Carlos Luis Vargas Guevara, Mg.

Ambato - Ecuador

enero - 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA PARA RADIODIFUSIÓN FM UTILIZANDO HARDWARE LIBRE EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Kevin Damián Durán Rojaldo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, enero 2026.

Firmado electrónicamente por:
CARLOS LUIS VARGAS GUEVARA
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Carlos Luis Vargas Guevara, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA PARA RADIODIFUSIÓN FM UTILIZANDO HARDWARE LIBRE EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2026.



Kevin Damián Durán Rojaldo

C.C. 1804481180

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, enero 2026.



Kevin Damián Durán Rojaldo

C.C. 1804481180

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Kevin Damián Durán Rojaldo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA PARA RADIODIFUSIÓN FM UTILIZANDO HARDWARE LIBRE EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, enero 2026.

Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO MAYORGA MAYORGA
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Firmado electrónicamente por:
CARLOS DIEGO GORDON GALLEGOS
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Carlos Gordón Gallegos, PhD
PROFESOR CALIFICADOR

Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN WILFRIDO SALAZAR LOGRONO
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Franklin Salazar Logroño, PhD.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mi madre Rocío y mi padre Eduardo, por todo su sacrificio y esfuerzo por ayudarme a ser mejor y esforzarme en el trayecto de la vida y no rendirme a pesar de cualquier circunstancia en la que me encuentre.

A mis hermanas Gabriela, Fernanda y mis hermanos Gabriel, Carlos, Justin por haber cuidado de mí y estar presentes en los días buenos y malos.

Ustedes son el motor que necesito para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de seguir con salud y vida para poder cumplir mis objetivos.

A mi padre y madre, por darme la confianza y oportunidad de poder llegar a ser un profesional. Gracias por todo.

A mis hermanas y hermanos por ayudarme incondicionalmente y por los momentos que alguna vez pasamos todos juntos. Gracias.

A mi tutor de tesis, Ing. Carlos Vargas, por brindarme su ayuda en el desarrollo y culminación del proyecto guiándome con su sabiduría y dedicándome su tiempo.

A la Universidad Técnica de Ambato, facultad FISEI por brindarme un lugar para formarme como profesional y a mis docentes, por sus consejos impartidos a lo largo de mi vida universitaria.

Este logro no solo es mío, sino de las personas que estuvieron en mi trayecto apoyándome. De todo corazón GRACIAS.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA ..... **i**

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**

AUTORÍA ..... **iii**

DERECHOS DE AUTOR ..... **iv**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

AGRADECIMIENTO ..... **vii**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **viii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **xvii**

RESUMEN EJECUTIVO ..... **xviii**

ABSTRACT ..... **xix**

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO **1**

1.1 Tema de investigación 1

1.1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Antecedentes investigativos 2

1.3 Fundamentación teórica 5

1.3.1 Tecnología Digital FM 5

1.3.2 Adaptabilidad y Escalabilidad de la Tecnología FM 5

1.3.3 Hardware Libre en Radio Digital 5

1.3.4 Entornos de desarrollo integrado (IDE) para Radio Definida por Software (SDR) 13

1.3.5 Comunicaciones Digitales 15

1.3.6 Modulación de audio digital 18

1.3.7 Sistema Digital de Transmisión FM 19

1.3.8 Introducción a DVswitch 20

1.3.9 Estándares Abiertos de Radio Digital 25

1.4 Objetivos 28

1.4.1 Objetivo general 28

1.4.2 Objetivos específicos 28

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 29

2.1 Materiales 29

2.2 Métodos 30

2.2.1 Modalidad de la investigación 30

2.2.2 Población y muestra 30

2.2.3 Recolección de información 31

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos 31

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 33

3.1 Revisión bibliográfica de sistemas digitales FM y tecnología SDR 33

3.1.1 Sistemas Digitales FM 33

3.1.2 Tecnología SDR 33

3.2 Identificación de parámetros clave: rango de frecuencias, SNR, BER, modulación digital aplicable. 34

3.2.1 Rango de frecuencias 34

3.2.2 Identificación de SNR y BER 34

3.2.3 Modulación Digital Aplicable 35

3.3 Análisis comparativo de arquitecturas SDR y hardware libre compatible. 35

3.4 Selección de bloques funcionales: módulo codificación digital, módulo de modulación FM, módulo transmisión RF. 36

3.4.1 Módulo Codificación Digital 36

3.4.2 Módulo de Modulación FM 37

3.4.3 Módulo de Transmisión RF 37

3.5 Diseño esquemático y físico del prototipo, incluyendo diagramas de bloques.... 39

3.5.1 Diagrama físico del Sistema de Transmisión Digital. 39

3.5.2 Diagrama de Bloques del Sistema 39

3.5.3 Arquitectura del Sistema 41

3.6 Implementación y configuración del hardware (SDR) y software (GNU Radio). 42

3.6.1 Implementación del sistema 42

3.6.2 Configuración de Dvswitch Mobile 43

3.6.3 Configuración de Dvswitch Server 44

3.6.4 Configuración de GNURadio 45

3.7 Validación del prototipo mediante mediciones de calidad de señal (espectro). .. 49

3.7.1 Transmisión en Dvswitch Server 49

3.8 Diseño de prácticas guiadas: instalación, transmisión básica, medición espectral, comparación analógica vs digital. 56

3.9 Elaboración de manual técnico para replicar el prototipo. 78

3.10 Preparación de material demostrativo para ferias académicas y jornadas de divulgación. 99

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 101

4.1 Conclusiones 101

4.2 Recomendaciones 102

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 103

ANEXOS 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros técnicos del dispositivo USRP N210 8

Tabla 2. Comparación entre tipos de Hardware Libre [15], [16], [17]. 10

Tabla 3. Parámetros técnicos de la Raspberry pi 3 12

Tabla 4. Análisis comparativo de IDE en Plataformas SDR. 15

Tabla 5. Parámetros de configuración de Dvswitch mobile 23

Tabla 6. Parámetros codificación AMBE 25

Tabla 7. Recolección de información..... 31

Tabla 8. Plataformas y tecnologías SDR..... 34

Tabla 9. Arquitecturas SDR 35

Tabla 10. Principio de funcionamiento de sistemas de transmisión FM y Digital. ... 38

Tabla 11. Configuración Dvswitch Mobile..... 44

Tabla 12. Configuración Dvswitch server 45

Tabla 13. Parámetros de configuración de la transmisión. 47

Tabla 14. Parámetros de configuración del receptor..... 49

Tabla 15. Cuadro comparativo de la transmisión en Dvswitch 50

Tabla 16. Análisis del BER..... 53

Tabla 17. Análisis SNR..... 55

Tabla 18. Parámetros de configuración..... 69

Tabla 19. Parámetros Dvswitch multiusuario 72

Tabla 20. Parámetros de TX y RX 98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivo USRP [13]. 6

Figura 2. Arquitectura de un sistema SDR [14]. 9

Figura 3. Arquitectura USRP 9

Figura 4. Placa Raspberry pi [18]. 11

Figura 5. Arquitectura Raspberry pi [18]. 11

Figura 6. Entorno de GNURadio 13

Figura 7. Entorno de visualización de LabView 14

Figura 8. Entorno gráfico de Matlab 14

Figura 9. Diagrama de proceso de transmisión de información [22]. 16

Figura 10. Transmisor Digital [22]. 16

Figura 11. Receptor Digital [22]. 17

Figura 12. Sistema Digital de Comunicación [29]. 19

Figura 13. Codificación digital [30] 20

Figura 14. Estructura de una comunicación en Dvswitch [32]. 21

Figura 15. Aplicación Dvswitch mobile. 23

Figura 16. Interfaz visual de Dvswitch [35]. 24

Figura 17. Proceso de Codificación AMBE [32]. 25

Figura 18. Diagrama de flujo del proyecto de investigación. 29

Figura 19. Diagrama de bloques del Módulo de Codificación [30]. 36

Figura 20. Módulo de Modulación FM [30]. 37

Figura 21. Módulo de Transmisión RF [41]. 37

Figura 22. Diagrama físico del Sistema de Transmisión. 39

Figura 23. Diagrama de bloques del Sistema de Transmisión. 40

Figura 24. Arquitectura lógica del Sistema de Transmisión Digital. 41

Figura 25. Arquitectura Funcional del Sistema..... 42

Figura 26.Transmisión Digital de Audio. 43

Figura 27. Proceso de transmisión y recepción FM de sonido con usrp. 43

Figura 28. Menú principal de configuración. 44

Figura 29. Bloques de transmisión..... 47

Figura 30. Bloques de recepción del sistema. 49

Figura 31. Modos de transmisión en Dvswitch..... 51

Figura 32. Ancho de banda de los modos digitales en Dvswitch..... 51

Figura 33. Ancho de banda de modos de transmisión en Dvswitch. 52

Figura 34. Señal de audio transmitida. 54

Figura 35.Señal de audio FM recibida. 54

Figura 36. Diagrama de constelación en la recepción..... 55

Figura 37. Dashboard Dvswitch-server..... 61

Figura 38. Ejemplo de dirección ip del dashboard..... 62

Figura 39. Componentes de la interfaz de Dvswitch 62

Figura 40. Aplicación Dvswitch. 67

Figura 41. Dialer 68

Figura 42. Status 68

Figura 43. Accounts 69

Figura 44. Sección Configuración..... 70

Figura 45.Ventana principal de configuración para multiusuario..... 72

Figura 46. Dvswitch instalado en dos dispositivos. 73

Figura 47. Entorno GNURadio 75

Figura 48. Transmisor de audio con archivo wav. 76

Figura 49. Receptor de audio 76

Figura 50. Componentes básicos del Sistema 79

Figura 51. Programa de instalación de imágenes de Sistemas Operativos (BalenaEtcher)..... 80

Figura 52. Menú del Programa BalenaEtcher 80

Figura 53. Imagen del SO Raspberry Pi Bullseye..... 80

Figura 54. Instalación del SO en la micro SD..... 81

Figura 55. Inicio de Instalación..... 81

Figura 56. Ventana de selección de país 82

Figura 57. Creación de Usuario y contraseña 82

Figura 58. Selección de compatibilidad de tamaño de monitor 83

Figura 59. Selección de red Wifi..... 83

Figura 60. Reinicio del SO..... 84

Figura 61. Menú principal dvswitch 85

Figura 62. Menú principal 86

Figura 63. Dashboard de Dvswitch 89

Figura 64. Aplicación Dvswitch Mobile 90

Figura 65. Selección de una cuenta 90

Figura 66. Configuración 91

Figura 67. Selección de TG Group 92

Figura 68. Verificación de conexión 92

Figura 69. Interfaz del Dashboard en Dvswitch 93

Figura 70. Interfaz de Virtual Box. 93

Figura 71. Interfaz de UBUNTU 94

Figura 72. Diagrama de conexión con el USRP 95

Figura 73. Configuración de IP en UBUNTU 96

Figura 74. Conexión del USRP 96

Figura 75. Transmisor de audio FM. 97

Figura 76. Receptor de audio FM. 97

Figura 77. Conexión Física del sistema de Transmisión FM. 99

Figura 78. Pruebas de funcionamiento del Sistema conectados físicamente. 100

Figura 79. Visualización de la conexión del sistema Digital con Dvswitch Mobile y Raspberry Pi. 100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Datasheet USRP N210 107

Anexo B. Datasheet Raspberry Pi 108

Anexo C. Paquete PulseAudio 109

Anexo D. Antena 110

Anexo E. Gráficas de Ancho de Banda Tx Digital 111

Anexo F. Bloques de funciones utilizadas para la transmisión FM en GNURadio 112

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de radiodifusión FM digital utilizando plataformas de radio definida por software (SDR), con el objetivo de fortalecer la formación práctica en la carrera de Telecomunicaciones. Debido a que la adopción de la tecnología SDR con sistemas digitales resulta muy costosa y alta complejidad, se plantea un prototipo funcional que emplea hardware libre y herramientas de código abierto, permitiendo su replicación en entornos educativos de bajos recursos.

El proyecto consta de la integración de bloques funcionales que simulan el comportamiento de un transmisor digital, utilizando plataformas como GNU Radio y dispositivos SDR tipo USRP. Además, se procede a realizar la respectiva validación del prototipo mediante pruebas de transmisión y recepción, evaluando parámetros técnicos como la calidad del audio, el espectro y la estabilidad del enlace.

Como resultado, se logró el desarrollo de un sistema digital en Dvswitch en el cual se configuró una Raspberry pi para que funcione como servidor ya que su costo no es muy elevado y realizar las configuraciones pertinentes. Por otra parte, se logró establecer una comunicación de audio FM utilizando GNU Radio y USRP verificando el espectro y la estabilidad del enlace.

Palabras claves: Raspberry Pi, open source, dvswitch, gnuradio, USRP.

ABSTRACT

This project proposes the design and implementation of a digital FM broadcasting system using software-defined radio (SDR) platforms, with the aim of strengthening practical training in the Telecommunications field. Because adopting SDR technology with digital systems is very costly and complex, a functional prototype is proposed that uses open-source hardware and tools, allowing its replication in low-resource educational environments.

The project consists of integrating functional blocks that simulate the behavior of a digital transmitter, using platforms such as GNU Radio and USRP-type SDR devices. Furthermore, the prototype is validated through transmission and reception tests, evaluating technical parameters such as audio quality, spectrum, and link stability.

As a result, a digital system was developed using DvSwitch, in which a Raspberry Pi was configured to function as a server, given its relatively low cost, to perform the necessary configurations. Additionally, FM audio communication was successfully established using GNU Radio and USRP, verifying the spectrum and link stability.

Keywords: Raspberry Pi, open source, dvswitch, gnuradio, USRP.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

"SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA PARA RADIODIFUSIÓN FM UTILIZANDO HARDWARE LIBRE EN LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO"

1.1.1 Planteamiento del problema

En el mundo digital la radio sigue ocupando una posición única en un entorno dominado por los teléfonos inteligentes, los servicios de streaming digital, redes sociales y diversos recursos multimedia. La radio de Frecuencia Modulada ofrece mayor calidad de sonido y resistencia a interferencias, no obstante, requiere una banda de frecuencia más amplia. Si bien la transición al audio digital parece inevitable en algunas partes del mundo, algunas formas de radio aún desempeñan un papel crucial, en particular la radio de onda corta (OW) y la de amplitud modulada (AM) [1].

A pesar de los avances tecnológicos, la radio sigue siendo una fuente importante de información y entretenimiento para millones de personas en todo el mundo. Un informe de la UNESCO de 2022 afirma que más de 44.000 emisoras de radio operan en todo el mundo y ofrecen programación en varios idiomas y dialectos. La relevancia de la radio, especialmente la AM y la onda corta, trasciende los centros urbanos y desempeña un papel crucial en las zonas rurales y remotas, especialmente en los países en desarrollo [2].

En Ecuador, la transición hacia la radiodifusión FM digital enfrenta desafíos significativos, incluyendo costos elevados, falta de infraestructura y necesidad de capacitación técnica. Sin embargo, también existen oportunidades para superar estas barreras mediante el uso de hardware libre y la implementación de programas de formación, lo que puede facilitar una adopción más amplia y equitativa de la radiodifusión digital [3].

Actualmente, muchas instituciones educativas, radios comunitarias y zonas rurales; continúan utilizando sistemas analógicos de radiodifusión FM, las cuales presentan limitaciones en cuanto a calidad de señal, eficiencia espectral y flexibilidad de configuración.

En la Universidad Técnica de Ambato, en la FISEI, específicamente en la Carrera de Telecomunicaciones es necesario disponer de un sistema digital de radiodifusión sonora. De esta manera, la implementación de módulos y el análisis práctico asociado a pruebas de transmisión digital FM empleando tecnología SDR (Software Definido por Radio) fortalecerá los conocimientos teóricos de los estudiantes. Por otra parte, el acceso a tecnologías de transmisión digital está restringido por los elevados costos de equipos comerciales y la dependencia de software propietario. Esta brecha tecnológica limita la capacidad de enseñanza, experimentación y modernización de los sistemas de comunicación.

Por tanto, es necesario desarrollar una alternativa open source, así como la utilización de USRP (dispositivo de radio definido por software que permite a los usuarios diseñar, prototipar e implementar sistemas de transmisión y recepción inalámbricos), asociados al diseño de un sistema digital de transmisión FM funcional, accesible y educativo con análisis de datos de tal forma que sea replicable y demostrativo.

1.2 Antecedentes investigativos

En el apartado de antecedentes investigativos se realizó un análisis exhaustivo y búsqueda de información relevante acerca de investigaciones y artículos relacionados al presente proyecto.

En el año 2022, en Ambato-Ecuador, Jonathan Alexander Ronquillo Gómez, en su investigación titulada “Sistema de monitoreo y control de los parámetros operativos de los transmisores de radiodifusión FM aplicando una estructura IoT y redes SDN” en la Universidad Técnica de Ambato, implementó un sistema de monitoreo y control de los parámetros operativos de los transmisores de radiodifusión FM en el cerro Pilishurco. Aplicó una estructura IoT y redes SDN, permitiendo realizar un breve

diagnóstico del equipo ante distintas fallas que se produzcan en el equipo, identificar la eficiencia energética del mismo, configurar la potencia transmitida del equipo por medio de una interfaz web a la que se puede acceder fuera de la red local. El principal resultado fue el desarrollo de una aplicación web intuitiva que facilita el monitoreo y control de un dispositivo IoT adaptado para la transmisión FM. Esta herramienta permite visualizar en tiempo real parámetros clave del transmisor, como frecuencia, potencia y estado operativo. La aplicación se ejecuta desde el cliente, disminuyendo la carga del servidor lo que mejora la eficiencia del sistema. Gracias a su diseño responsivo, puede ser accedida desde navegadores web móviles y de escritorio, ofreciendo una interfaz clara para supervisar el comportamiento del transmisor FM, análisis del espectro, realizar ajustes remotos y garantizar una operación continua desde diversas plataformas [4].

En el año 2022, en Guayaquil-Ecuador, Vanessa Stephania Pazmiño Quiguango y Luis Erick Espinoza Pionce, en su artículo científico titulado "Diseño e implementación de un banco de pruebas de laboratorio aplicado a FM broadcasting utilizando software Opensource GNURADIO, Raspberry pi y Radio Definida por Software" en la Universidad Politécnica Salesiana, desarrollaron un banco de pruebas de laboratorio aplicado a FM. Como resultado se presentó el diseño realizado para el desarrollo de competencias y habilidades de los futuros ingenieros en telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. El desarrollo del proyecto permitió aplicar de manera práctica los conocimientos adquiridos en las áreas de electrónica, comunicaciones digitales, redes inalámbricas y medios de transmisión, mediante la elaboración de guías de laboratorio orientadas a fortalecer el aprendizaje experimental [5].

En el año 2023, en Loja-Ecuador, Jéssica Tatiana Córdova Sari, en su investigación titulada "Desarrollo de Prácticas de Comunicaciones Digitales utilizando Radio Definida por Software (SDR) para el Laboratorio de Telecomunicaciones de la FEIRNNR – UNL" en la Universidad Nacional de Loja, desarrolló un conjunto de prácticas de laboratorio en comunicaciones digitales. Empleó tecnologías SDR como RTL-SDR, LimeSDR Mini y Pluto-SDR, junto con sistemas operativos basados en Linux. Las prácticas permitieron a los estudiantes relacionar conceptos teóricos con aplicaciones prácticas, explorando la recepción y transmisión de señales digitales. El

resultado consistió en la elaboración de guías prácticas para los estudiantes, lo cual facilita una mejor comprensión y entendimiento acerca de la radio definida por software en entornos educativos [6].

En el año 2024, en Guayaquil-Ecuador, Anderson Fabricio Zapata Chicaiza y Francisco Saúl Calahorrano Garzón, en su artículo científico titulado "Desarrollo de un sistema de transmisión de radiodifusión sonora FM digital usando un dispositivo USRP 2944RIO" en la Universidad Politécnica Salesiana, desarrollaron un sistema de transmisión de radiodifusión sonora FM digital. El artículo presenta el estudio experimental del aprovechamiento del ancho de banda en una transmisión FM al digitalizar la señal emitida por el USRP 2944RIO y configurada a través del software LabView. El enlace inalámbrico implementado fue sometido a pruebas de transmisión y recepción en un entorno controlado empleando la modulación digital Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) que mejoró la eficiencia espectral del sistema alcanzando un total de 508 canales digitales. Como resultado del proyecto se evidenció que es posible transmitir 3 señales digitalizadas dentro de un mismo ancho de banda de un canal en frecuencia modulada [7].

En el año 2024, en Ambato-Ecuador, Jonathan David Palán Murillo, en su investigación titulada "Guías de prácticas de laboratorio interdisciplinarias para sistemas de comunicaciones utilizando radio definido por software" en la Universidad Técnica de Ambato, desarrolló un conjunto de prácticas de laboratorio empleando software libre (GNU Radio) y dispositivos USRP N200. El propósito es complementar el estudio teórico de áreas académicas contempladas en la carrera de Telecomunicaciones [8]. El resultado del proyecto de investigación consistió en la elaboración de guías prácticas de laboratorio orientado a sistemas digitales de comunicaciones, forjando el conocimiento de los estudiantes acerca de los sistemas SDR y sus correspondientes aplicaciones.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Tecnología Digital FM

La radiodifusión en Frecuencia Modulada (FM) digital representa una evolución de la transmisión analógica convencional, mejorando aspectos como la eficiencia espectral, la calidad del audio y la resistencia al ruido. Su funcionamiento se basa en la conversión de la señal de audio en datos digitales, permitiendo su manipulación y transmisión mediante técnicas avanzadas de modulación [9]. Este enfoque digital también posibilita la inclusión de servicios adicionales, como metadatos o multiplexado de múltiples señales.

a. Accesibilidad Tecnológica

La tecnología digital FM ha mejorado la accesibilidad en el ámbito de la radiodifusión al permitir que emisoras de bajo presupuesto integren herramientas open source, eficientes y escalables. Gracias al uso de hardware libre como el USRP, HackRF, DVSWITCH o incluso microcontroladores avanzados, y de software libre como GNU Radio, se ha democratizado el acceso a la transmisión de señales digitales sin necesidad de costosos equipos propietarios [10].

1.3.2 Adaptabilidad y Escalabilidad de la Tecnología FM

La digitalización permite una mayor adaptabilidad, ya que las características del sistema, como el ancho de banda o la potencia de transmisión, pueden modificarse mediante software. Asimismo, su escalabilidad facilita que un sistema básico pueda ampliarse a redes de transmisión más complejas o incorporar nuevas funcionalidades sin necesidad de grandes inversiones en hardware adicional [11].

1.3.3 Hardware Libre en Radio Digital

El hardware libre como el USRP (Universal Software Radio Peripheral)**,** HackRF One o incluso Raspberry Pi (RTL-SDR)**,** permite a investigadores e instituciones desarrollar y experimentar con sistemas de radiocomunicación de bajo coste.

Estos dispositivos reconfigurables mediante software permiten la transmisión y recepción de señales en múltiples bandas de frecuencia, favoreciendo el acceso a la tecnología de radiodifusión [12].

a. Dispositivo USRP

El USRP (Universal Software Radio Peripheral) es un dispositivo de hardware libre ampliamente utilizado en aplicaciones de radio definida por software (SDR), que ha transformado la accesibilidad a sistemas de radiocomunicación de alto rendimiento. Aunque su costo es mayor en comparación con otros dispositivos SDR como HackRF o RTL-SDR, su capacidad de procesamiento y compatibilidad con plataformas de código abierto permite una mayor y rápida escalabilidad con tecnologías innovadoras [13]. En la Figura 1, se puede visualizar un dispositivo USRP con sus respectivos puertos.

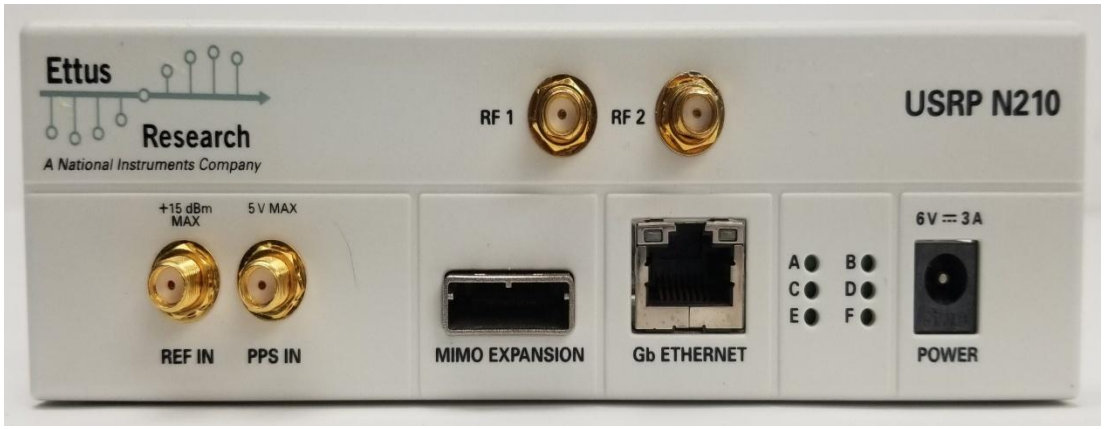


Figura 1. Dispositivo USRP [13].

El dispositivo USRP utiliza diferentes puertos los cuales se mencionan a continuación:

- ***Ref Clock***

Entrada de señal de referencia para el oscilador local con una señal de 10 MHz y un rango de potencias de 0 a 15 dBm.

- ***PPS IN***

Entrada de temporizador de pulso.

- ***RF1***

Transmisor de señales de radiofrecuencia con conector SMA con una impedancia de 50 Ω.

- ***RF2***

Transmisor de señales de radiofrecuencia con conector SMA con una impedancia de 50 Ω.

- ***MIMO EXPANSION***

Ranura para expansión MIMO.

- ***GB ETHERNET***

Puerto Gigabit Ethernet para establecer la comunicación a través de cable de red con el ordenador.

- ***POWER***

Entrada de alimentación del dispositivo USRP con 6v y 1,3A.

En la Tabla 1 se detallan los parámetros técnicos correspondientes al dispositivo USRP N210 con sus respectivas especificaciones..

Tabla 1. Parámetros técnicos del dispositivo USRP N210

Parámetro	Especificación técnica
Modelo	USRP N210 (Universal Software Radio Peripheral)
Fabricante	National Instruments
Arquitectura	Software Defined Radio (SDR)
Procesador (FPGA)	Xilinx Spartan-3A-DSP 3400 (XC3SD3400A)
Conversores A/D (ADC)	14 bits – 100 MS/s
Conversores D/A (DAC)	16 bits – 400 MS/s
Frecuencia de muestreo	Hasta 25 MS/s
Rango de frecuencia	0 – 6 GHz
Ganancia de transmisión (TX)	Aproximadamente 0 a 30 dB
Ganancia de recepción (RX)	0 a 30 dB
Interfaz de red	Gigabit Ethernet (1 Gbps)
Reloj de referencia interno	100 MHz (puede sincronizarse con referencia externa de 10 MHz)
Sincronización	PPS (Pulse Per Second) y 10 MHz externo
Memoria RAM	4 MB (para buffering interno)
Fuente de alimentación	6 V a 15 V DC (consumo típico: 6 W – 12 W)
Conectores de RF	SMA hembra (para RX/TX según tarjeta hija)
Conectores adicionales	Puerto GPIO, reloj externo, PPS, y alimentación
Dimensiones físicas	165 mm × 165 mm × 50 mm
Peso aproximado	0.85 kg
Sistema operativo compatible	GNU Radio, UHD Driver (Linux/Windows)
Temperatura de operación	0 °C a 55 °C

b. Arquitectura SDR

Se basa en el principio de reemplazar componentes de radio tradicionales implementados en hardware por componentes de software que pueden ser ejecutados en computadoras, microcontroladores o sistemas embebidos [14].

En la Figura 2 se observa la arquitectura de un sistema SDR.

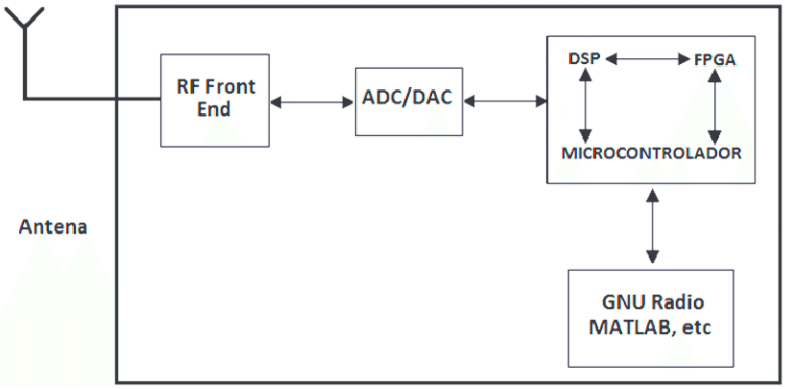


Figura 2. Arquitectura de un sistema SDR [14].

c. Arquitectura del USRP N210

El USRP es un dispositivo fundamental en la Radio Definida por Software (SDR), que traslada las funciones tradicionales de hardware de radio (modulación, filtrado, mezcla de frecuencias) al dominio del software. Su arquitectura es inherentemente modular y se divide en tres bloques principales; el host o pc, la tarjeta madre (mainboard) y la tarjeta hija (daughterboard) [15].

En la Figura 3 se puede observar el diagrama de la arquitectura que tiene el dispositivo USRP.

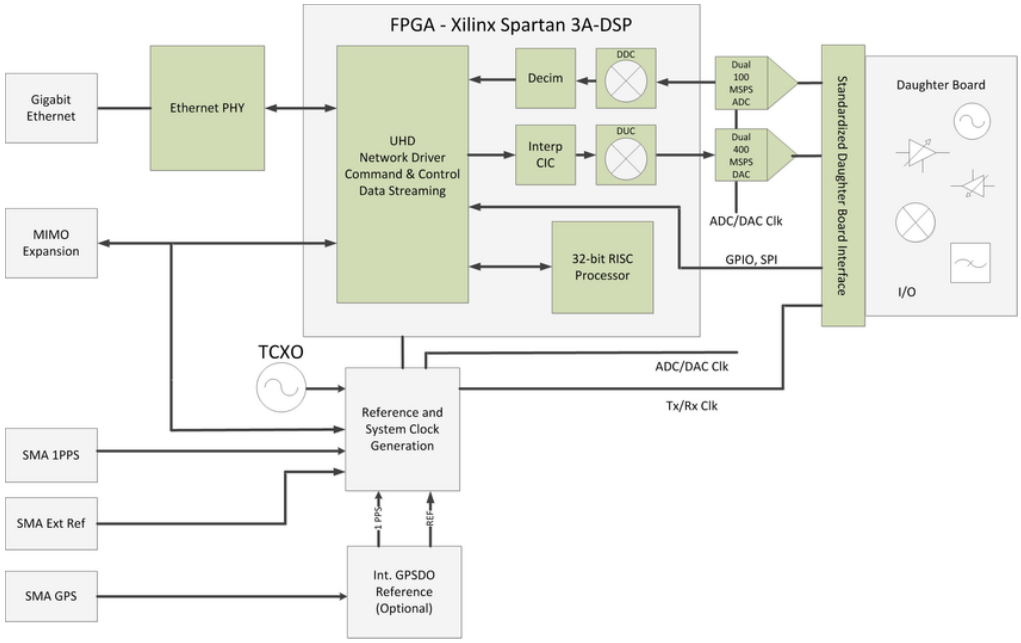


Figura 3. Arquitectura USRP

- ***FPGA-Xilinx Spartan 3A-DSP***

Es el componente principal del USRP N210, que se encarga de procesar las señales digitales que provienen o van hacia el ADC, el DAC y el host. La FPGA tiene recursos lógicos, de memoria y DSP suficientes para implementar funciones personalizadas, como filtros, moduladores, demoduladores, codificadores, decodificadores, entre otros [15].

- ***TCXO***

Es el oscilador controlado por temperatura que genera la señal de reloj.

- ***Daughter Board***

Es un bloque que contiene una tarjeta hija, que es una placa de circuito impreso que se conecta al sistema principal para ampliar sus funcionalidades o adaptarse a diferentes bandas de frecuencia [15].

En la Tabla 2 se muestra un análisis comparativo entre tipos de hardware SDR.

Tabla 2. Comparación entre tipos de Hardware Libre [15], [16], [17].

Dispositivo	Rango de Frecuencia	Ancho de Banda (BW)	Capacidad de Operación	Aplicación	Costo Estimado
Usrp (Línea N200)	70 MHz a 6 GHz	56 MHz	Full-Duplex	Prototipos avanzados, investigación, aplicaciones con alto BW y baja latencia.	$1100
HackRF One	1 MHz a 6 GHz	20 MHz	Half-Duplex	Desarrollo, proyectos con amplio rango de frecuencia, operaciones que no requieren TX y RX simultáneo.	$400
LimeSDR Mini	10 MHz a 3.5 GHz	Hasta 30.72 MHz	Full-Duplex	Proyectos que necesitan capacidad Full-Duplex a un coste menor que USRP, aplicaciones IoT/5G.	$100
Adalm-Pluto (PlutoSDR)	70 MHz a 6 GHz	20 MHz	Half-Duplex	Aplicaciones educativas, proyectos de radioaficionados.	$80

d. Raspberry pi

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo y tamaño compacto, similar al de una tarjeta de crédito. Puede conectarse a un monitor o televisor y usarse con un teclado y mouse estándar. Este dispositivo, que ejecuta sistemas operativos basados en Linux, está diseñado para explorar la computación y aprender a programar en lenguajes como Python y Scratch [18].

A continuación, se muestra la Figura 4 que hace referencia a la placa Raspberry pi.



Figura 4. Placa Raspberry pi [18].

e. Arquitectura Raspberry pi

La arquitectura de una Raspberry Pi se basa en un concepto de sistema en un chip (SoC), donde la mayoría de los componentes principales de una computadora (CPU, GPU y RAM) se encuentran integrados en un solo circuito. Esta arquitectura Figura 5 se distingue por su diseño compacto, bajo consumo de energía y precio accesible [18].

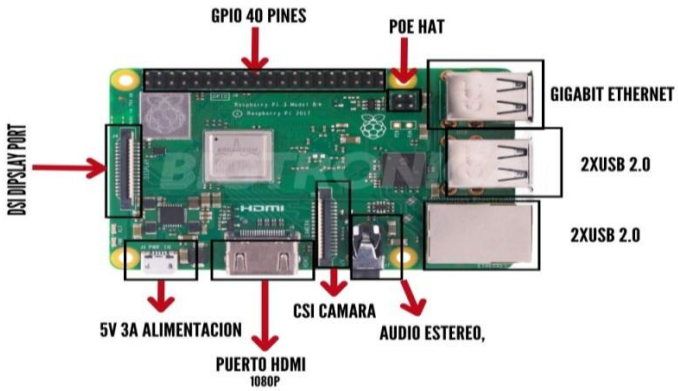


Figura 5. Arquitectura Raspberry pi [18].

- ***Procesador (CPU)***

Raspberry Pi utilizaban una CPU ARM de 32 bits, mientras que las más recientes, como la Raspberry Pi 4 y la 5, incorporan procesadores de 64 bits y múltiples núcleos, como el ARM Cortex-A72 y el ARM Cortex-A76.

- ***Procesador Gráfico (GPU)***

Se encarga del procesamiento de gráficos y video, lo que permite la conexión a pantallas y la reproducción de contenido multimedia de alta calidad.

- ***Conectores de pines GPIO***

Conector de entrada/salida de 40 pines (GPIO) los cuales permiten que la placa interactúe con componentes externos como sensores, motores y otros dispositivos electrónicos.

- ***Almacenamiento***

La Raspberry Pi utiliza una tarjeta microSD como dispositivo de almacenamiento principal, donde se instala el sistema operativo (como Raspberry Pi OS) y se guardan los archivos.

En la Tabla 3 se presenta un análisis de los parámetros técnicos de la Raspberry pi 3 model B.

Tabla 3. Parámetros técnicos de la Raspberry pi 3

Parámetro	Especificación técnica
Modelo	Raspberry Pi 3 Model B
Procesador (CPU)	Broadcom BCM2837, Quad-Core ARM Cortex-A53 (64-bit) a 1.2 GHz
Memoria RAM	1 GB LPDDR2 (900 MHz)
Almacenamiento	Tarjeta microSD
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.1 (BLE)
Ethernet	10/100 Mbps RJ-45
Puertos USB	4 × USB 2.0
Puertos GPIO	40 pines
Puertos de video	HDMI completo, salida compuesta (a través de conector de 3.5 mm)
Alimentación eléctrica	5 V / 2.5 A través de conector micro-USB
Sistema operativo compatible	Raspberry Pi OS, Ubuntu, Kali Linux
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C

1.3.4 Entornos de desarrollo integrado (IDE) para Radio Definida por Software (SDR)

a. GNURADIO

GNU Radio es un marco de desarrollo de software libre que proporciona funciones de procesamiento de señales para la implementación de radios definidas por software. El marco ofrece un enfoque de diseño gráfico, además de admitir el desarrollo en Python y C++. Con el respaldo global de la comunidad de código abierto y ampliamente utilizado en entornos gubernamentales, comerciales y académicos, GNU Radio brinda a los usuarios acceso a un conjunto diverso de proyectos existentes centrados en la investigación de comunicaciones inalámbricas y la implementación de sistemas de radio del mundo real [19]. A continuación, se muestra la Figura 6 que representa el entorno de GNURadio.

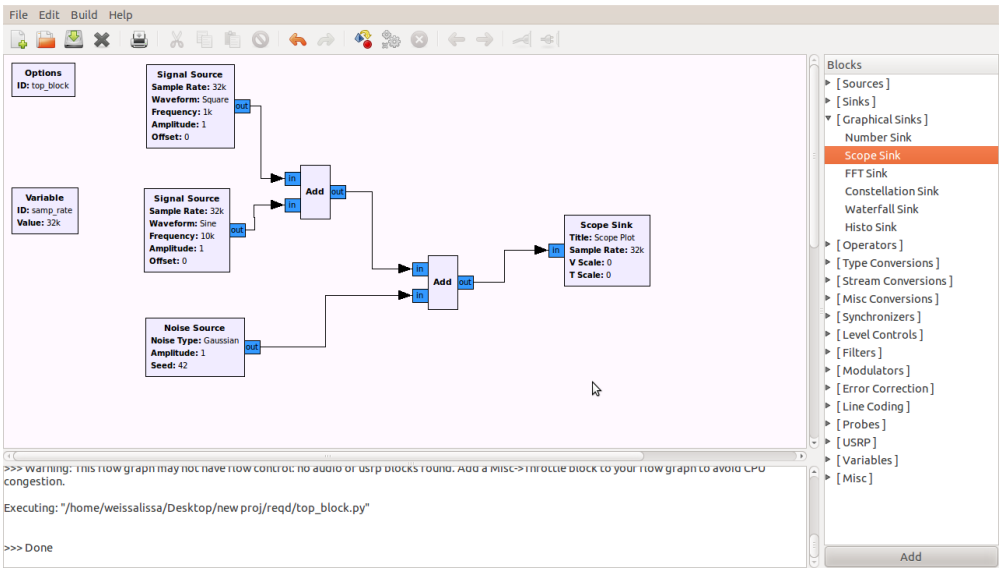


Figura 6. Entorno de GNURadio

b. LABVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica que ofrece aceleradores de productividad únicos para el desarrollo de sistemas de prueba, como un enfoque intuitivo para la programación, conectividad con cualquier instrumento, interfaces de

usuario totalmente integradas y optimizados para pruebas [20]. En la Figura 7 se visualiza el entorno de LabView.

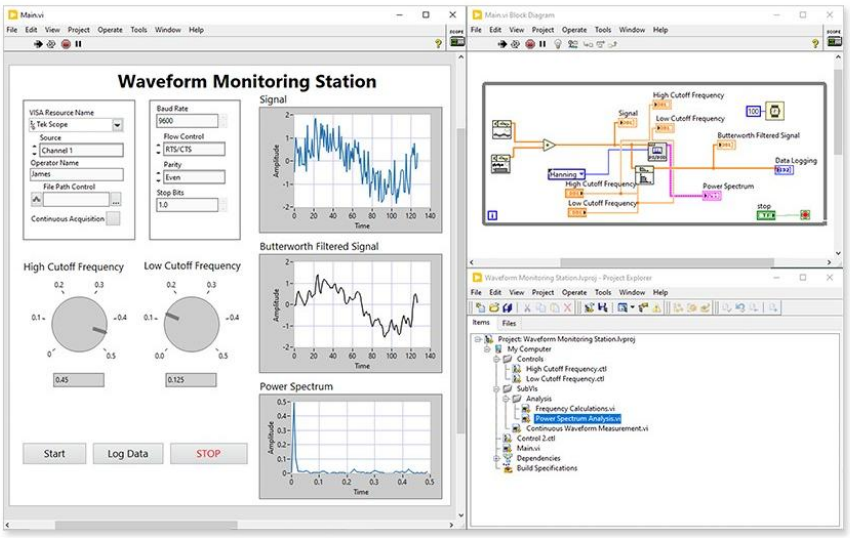


Figura 7. Entorno de visualización de LabView

c. MATLAB

Es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. MATLAB combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente [21]. En la Figura 8 se visualiza el entorno gráfico de Matlab.

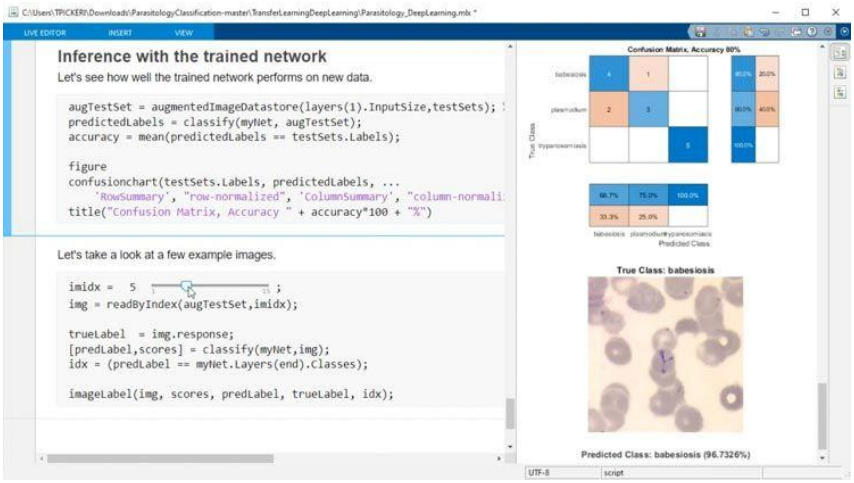


Figura 8. Entorno gráfico de Matlab

En la Tabla 4, se presenta un análisis comparativo de diversas plataformas de desarrollo para Radio Definida por Software (SDR). En esta tabla, se consideran aspectos como el tipo de licencia, el lenguaje de programación, y las posibles aplicaciones técnicas.

Tabla 4. Análisis comparativo de IDE en Plataformas SDR.

IDE	Tipo de licencia	Lenguaje principal	Características destacadas	Nivel de dificultad	Aplicaciones comunes
GNU Radio	Libre (GPL)	Python/C++	Gran comunidad, bloques modulares, integración directa con UHD	Media	Prototipos SDR, FM, AM, radar, IoT
LabVIEW	Comercial	Gráfico (G)	Interfaz visual, integración nativa con USRP de NI, ideal para pruebas rápidas	Baja	Educación, pruebas RF, prototipos industriales
MATLAB + Simulink	Comercial	MATLAB	Potente en procesamiento de señales, soporte para USRP vía Communications Toolbox	Media	Radar, comunicaciones digitales, GNSS
Python + UHD API	Libre	Python	Control directo de USRP, flexible, ideal para desarrolladores avanzados	Alta	Sistemas personalizados, investigación
OSSIE	Libre (Apache)	C++	Arquitectura CORBA, orientado a sistemas distribuidos SDR	Alta	Investigación académica, SDR distribuido

1.3.5 Comunicaciones Digitales

La digitalización implica transformar señales analógicas en datos discretos mediante muestreo **y** cuantificación, proceso necesario para el procesamiento digital de señales (DSP). En la transmisión FM, se pueden añadir filtros digitales, compresión, codificación y modulación de la información con alta precisión y flexibilidad, mejorando la eficiencia y calidad de la señal transmitida [22].

En la Figura 9, se puede observar el diagrama general del proceso de transmisión y recepción de información en el cual se visualizan bloques empezando desde la fuente de información, transmisión, canal y finalizando con la recepción.

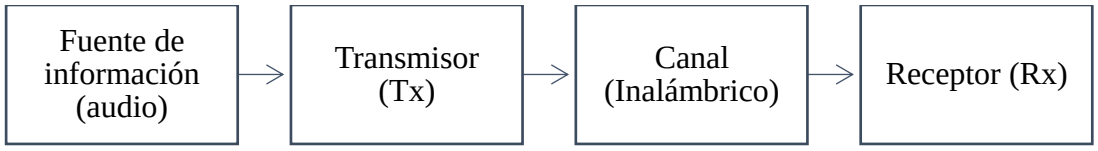


Figura 9. Diagrama de proceso de transmisión de información [22].

a. Transmisor digital

Un transmisor digital es el dispositivo encargado de transmitir información en forma de señales. Su función principal es tomar datos originales (como audio, vídeo o información de sensores) y transformarlos en una señal adecuada para el medio de transmisión. Para ello, primero convierte la información en bits, luego aplica técnicas de codificación que protegen los datos de errores y, finalmente, realiza una modulación digital para adaptar los datos a una frecuencia portadora que pueda transmitirse por radio, cable o fibra óptica [22]. En la Figura 10 se observa un diagrama de bloques correspondiente al transmisor digital.

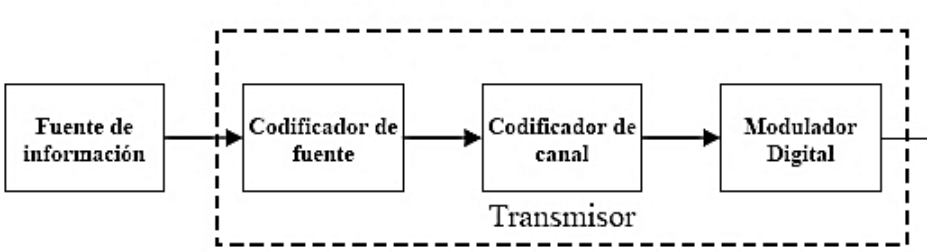


Figura 10. Transmisor Digital [22].

b. Receptor digital

Es el dispositivo que recibe la señal y la reconstruye para convertirla en información útil para el usuario. Su proceso consiste en capturar la onda transmitida, demodularla para recuperar los bits originales, aplicar mecanismos de corrección de errores y, finalmente, decodificar la información para presentarla en su formato original, ya sea audio, imagen o datos [22]. En la Figura 11 se presenta el diagrama de bloques que corresponde al receptor digital de datos.

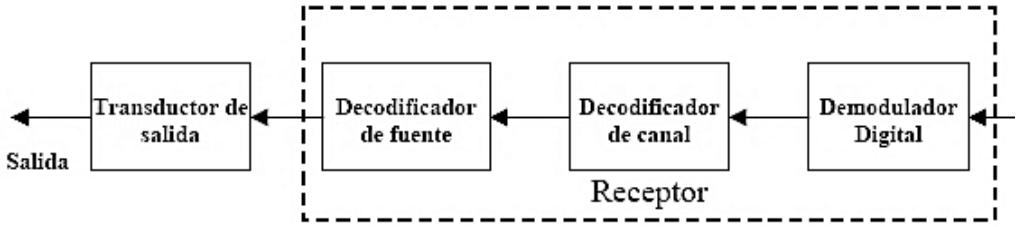


Figura 11. Receptor Digital [22].

c. Codificador

Un codificador es un bloque del sistema de comunicación encargado de transformar la información original en un formato más eficiente o más seguro para su transmisión. Dependiendo del tipo de codificación, puede comprimir los datos (codificación de fuente) o añadir bits redundantes para la detección y corrección de errores (codificación de canal). Gracias a este proceso, la señal transmitida es más resistente al ruido, interferencias y pérdidas durante el envío [23].

d. Decodificador

El decodificador realiza la operación inversa al codificador. Su función principal es interpretar los datos recibidos, eliminando la redundancia introducida en el transmisor y recuperando la información original en la forma más fiel posible. Si se trata de codificación de canal, el decodificador también corrige los errores que se hayan producido durante la transmisión [24].

e. Conversor ADC

El conversor analógico-digital (ADC) es un dispositivo que transforma una señal analógica, continua en el tiempo y en amplitud, en una señal digital compuesta por una secuencia de bits. Esto se realiza mediante un proceso de muestreo, cuantificación y codificación. El ADC es esencial en los transmisores digitales, ya que permite digitalizar señales como voz o video para que puedan ser procesadas y transmitidas en forma digital [25].

f. Conversor DAC

El convertidor digital-analógico (DAC) realiza la función inversa del ADC. Su tarea es transformar los datos digitales (bits) en una señal analógica continua, para que pueda transmitirse por un canal físico o reproducirse mediante un dispositivo como un altavoz o una pantalla. En los sistemas de comunicación, el DAC se utiliza en la etapa de transmisión para generar la señal analógica modulada a partir de la información digital [26].

1.3.6 Modulación de audio digital

El uso de Software Defined Radio (SDR) elimina la dependencia de hardware específico para tareas como modulación o filtrado, implementándolas por software. Herramientas como GNU Radio permiten construir flujos de señal completos mediante bloques funcionales interconectados, ideales para fines académicos, experimentales o comunitarios. Combinado con hardware libre, el SDR facilita el desarrollo de transmisores FM con alta versatilidad [27].

a. Técnicas de Modulación

Existe la FM analógica que puede implementarse con osciladores controlados por voltaje (VCO) en hardware, o mediante bloques digitales en SDR. Por otro lado, se encuentra la FM digital destacando técnicas muy variadas como ASK, FSK, PSK, QAM; que permiten una mayor calidad de transmisión de señales. Adicionalmente, con FM digital se tiene un mayor alcance con degradación gradual con la distancia y la interferencia [28].

b. Modulación en sistemas SDR

La modulación en sistemas SDR se realiza mediante librerías o bloques en plataformas como GNU Radio, entre otros. Permite la configuración de tasa de muestreo, frecuencia portadora, ganancia [28].

1.3.7 Sistema Digital de Transmisión FM

El sistema digital de transmisión FM consiste en la utilización de la modulación por frecuencia (FM) no solo para transportar señales analógicas de audio, sino también para la transmisión de datos digitales. Esta técnica ha evolucionado para permitir la inclusión de información adicional como texto, imágenes y servicios de datos que complementan la señal de audio principal. El uso de plataformas de radio definidas por software (SDR), como GNU Radio junto a dispositivos USRP, posibilita digitalizar completamente el proceso de transmisión y recepción, permitiendo implementar sistemas FM híbridos o completamente digitales. Estos sistemas pueden incluir codificación digital de audio y técnicas de modulación digital, optimizando el uso del espectro y mejorando la calidad y robustez de la transmisión [29].

En la Figura 12 se puede observar un diagrama de bloques de un sistema digital de Comunicación el cual comienza por la fuente de información y culmina en el transductor de salida luego de haber realizado todo el proceso de codificación, modulación, demodulación y de codificación.

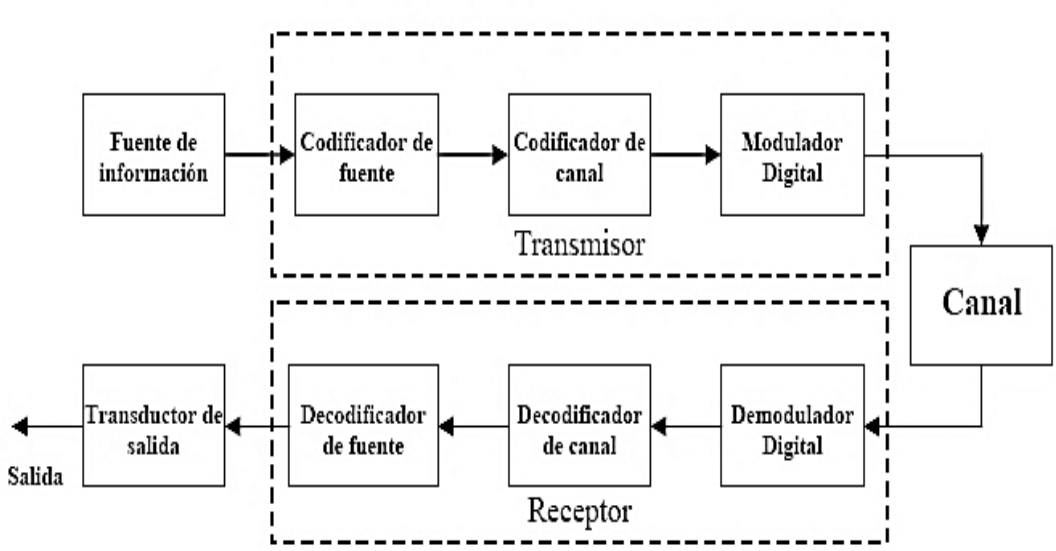


Figura 12. Sistema Digital de Comunicación [29].

a. Digitalización de señales

La digitalización implica transformar señales analógicas en datos discretos mediante muestreo **y** cuantificación**,** etapas necesarias para el procesamiento digital de señales (DSP). En la transmisión FM, esta conversión permite aplicar filtros digitales, compresión, codificación y modulación con alta precisión y flexibilidad, mejorando la eficiencia y calidad de la señal transmitida [29].

b. Codificación de audio digital

La señal de audio analógica (como la voz o la música) se convierte en una representación digital que puede ser almacenada, procesada o transmitida por dispositivos electrónicos [30].

En la Figura 13 se muestra el proceso de codificación digital de una señal.

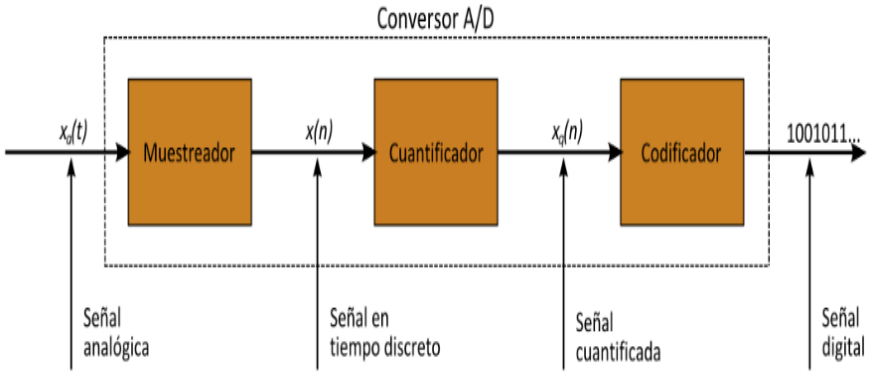


Figura 13. Codificación digital [30]

1.3.8 Introducción a DVswitch

DVSwitch es una suite de aplicaciones de software que permiten a los radioaficionados operar radios digitales a través de la red IP. Es compatible con varios modos de comunicación digital, incluyendo DMR, D-Star, YSF, entre otros [31].

Su principal objetivo es facilitar la comunicación entre redes y protocolos diferentes mediante una infraestructura basada en software, utilizando servidores como DVSwitch Server o Analog_Bridge para la conversión de audio y protocolos digitales [31].

En dvswitch el audio y los comandos viajan como paquetes de datos a través de su conexión Wi-Fi o datos móviles utilizando el protocolo IP (Internet Protocol) y UDP (User Datagram Protocol). Específicamente utiliza USRP client mode el cual interactua con los diferentes modos digitales (DMR, YSF, P25, etc) a través del servidor DVSwitch [31].

Utiliza un modo de codificación IAX2/AllStar en el cual el códec común utilizado en estos enlaces es G.711 (*u-law* o *a-law*) que ofrece alta calidad de voz con latencia relativamente baja [31].

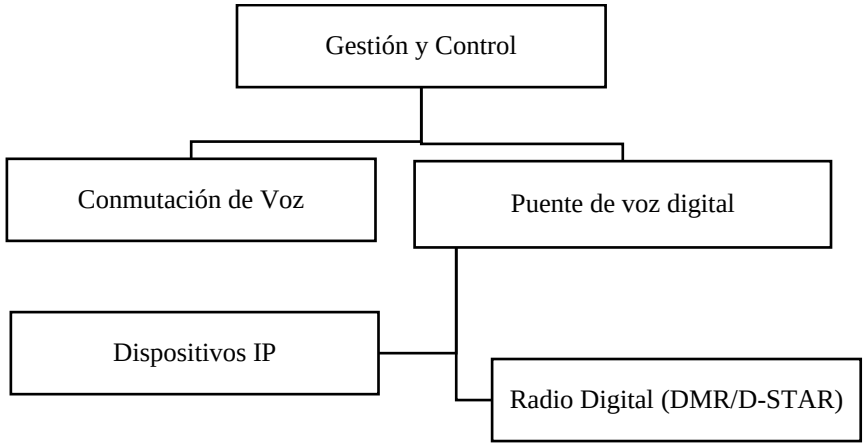


Figura 14. Estructura de una comunicación en Dvswitch [32].

La Figura 14 muestra la estructura de un sistema de transmisión en Dvswitch el cual comienza por la gestión de las conexiones y configuración de los usuarios. El conmutador de voz se encarga de enrutar las señales de voz hacia los diferentes dispositivos. El puente digital conecta las diferentes tecnologías permitiendo conexión entre la comunicación. Por último, se envía la voz a través de DMR y se puede verificar con los dispositivos conectados.

a. Dvswitch Server

Es una herramienta que actúa como núcleo de gestión de conexiones en la cual se realiza todo el proceso de configuración, instalación de paquetes que son útiles para poder realizar transmisiones [33].

DVSwitch se emplea como una herramienta de software que facilita la implementación de un sistema digital de transmisión de audio, demostrando cómo las soluciones basadas en código abierto pueden sustituir infraestructuras costosas y cerradas. Además, su compatibilidad con plataformas como Raspberry Pi refuerza su aplicabilidad en entornos educativos y experimentales, fomentando la innovación tecnológica en el ámbito de las telecomunicaciones [33].

b. Analog-Bridge

Analog Bridge es un componente del software que actúa como un puente para conectar y reflejar el tráfico de voz analógica entre diferentes redes de radioaficionados. Permite a los radioaficionados usar su servidor DVSwitch para conectarse a otros usuarios en redes distintas, actuando como un reflector para escuchar y transmitir [34].

c. Dvswitch Mobile

DVSwitch Mobile es una aplicación especializada que permite a los usuarios conectarse desde su dispositivo móvil a un nodo. La configuración del acceso a DVSwitch Mobile es similar a la del acceso telefónico, pero se utiliza un parámetro de línea de comandos diferente que se configura en dvswitch server [35].

El servidor DVSwitch actúa como un concentrador que conecta a los usuarios de DVSwitch Mobile a la red AllStarLink, permitiéndoles así comunicarse en diferentes modos digitales como DMR, D-STAR, Fusion, entre otros [35].

En la Figura 15 se visualiza el entorno de la aplicación dvswitch Mobile con sus diferentes secciones. La configuración se realiza en la sección de Accounts para poder establecer la comunicación.

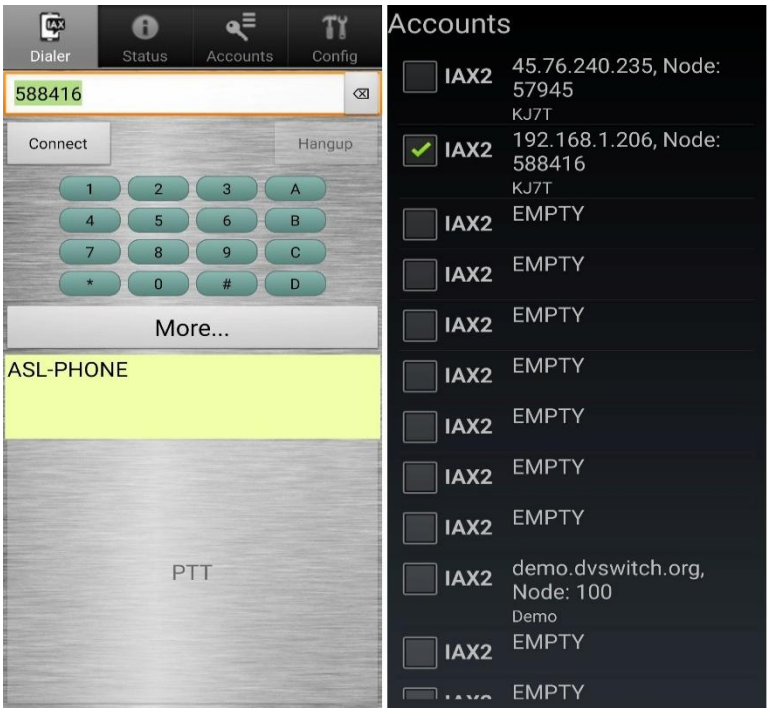


Figura 15. Aplicación Dvswitch mobile.

En la Tabla 5 se muestra los parámetros de configuración de dvswitch mobile para establecer comunicación con dvswitch server.

Tabla 5. Parámetros de configuración de Dvswitch mobile

Parámetro	**Descripción**
Protocolo	USRP
Hostname	Ip del servidor
Port	Puerto de enlace
Callsing	Nombre del enlace
DMR ID	Identificador ID

d. Dvswitch Dashboard

Es una interfaz visual que muestra los indicadores de desempeño y datos de operación para monitorizar el estado y el rendimiento del sistema de forma centralizada. Este panel presenta información importante organizada en gráficos y texto, permitiendo a los usuarios hacer un seguimiento de las métricas fundamentales para gestionar el funcionamiento de su nodo de radio dvswitch [35].

La Figura 16 muestra la interfaz visual de dvswitch en la cual se puede realizar un monitoreo del audio enviado por la aplicación de dvswitch mobile, visualizar el status, la actividad local y la información del hardware.

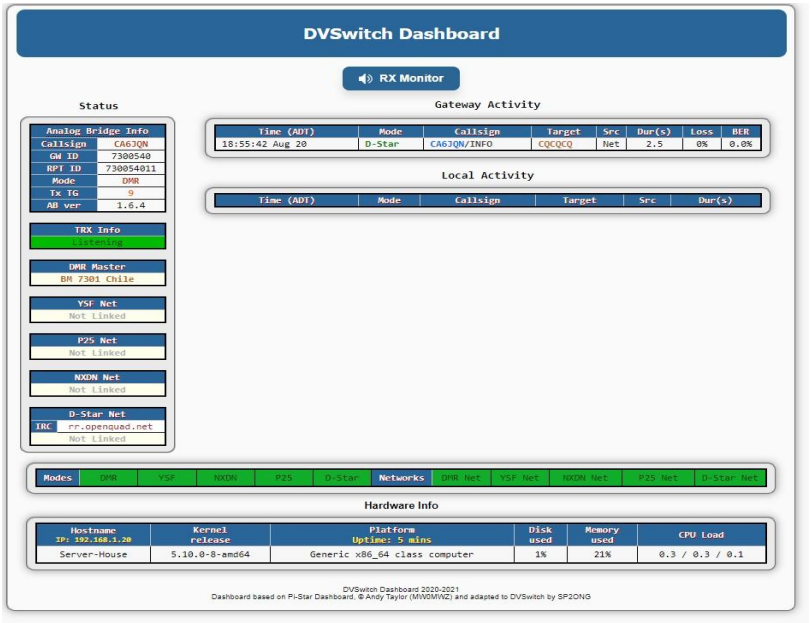


Figura 16. Interfaz visual de Dvswitch [35].

e. Codificación AMBE

AMBE (Advanced Multi-Band Excitation) es una tecnología de compresión de voz que se utiliza en sistemas de radio digital y satelital para lograr una alta calidad de voz a bajas tasas de bits. Se aplica en varios sistemas de comunicación, como las radios de radioaficionados D-STAR, los sistemas de radio troncalizados, los sistemas de comunicación y la radio satelital [32].

En la Figura 17 se muestra el proceso de codificación utilizando tecnología de voz AMBE.

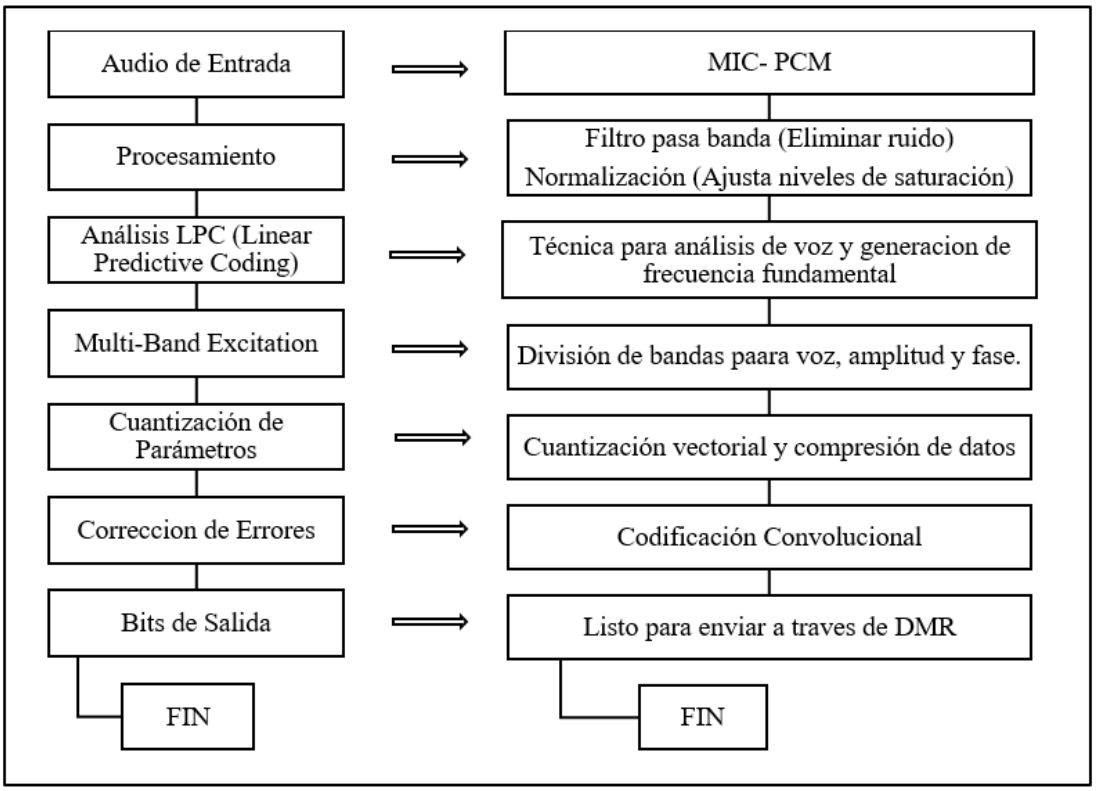


Figura 17. Proceso de Codificación AMBE [32].

En la Tabla 6 se muestra los parámetros técnicos que tiene la codificación AMBE.

Tabla 6. Parámetros codificación AMBE

Parámetro	**Especificación**
Frecuencia de Muestreo	8000 Hz
Duración del Marco (Frame)	20 (ms)
Tasa de Bits de Voz	2.0 kbps a 9.6 kbps
Complejidad	Baja

1.3.9 Estándares Abiertos de Radio Digital

a. DMR

Es un estándar abierto de radio digital que permite a los operadores transmitir voz y datos con mayor eficiencia y calidad que la radio analógica tradicional [36].

La principal característica del DMR es el uso de la tecnología de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), que permite dos conversaciones simultáneas en una única frecuencia de radio. Esto se logra dividiendo un canal de 12,5 kHz en dos "bloques de tiempo" o time slots [36].

El tipo de modulación que tiene es el 4-FSK debido a que es la más utilizada para estos tipos de comunicación. Para poder utilizar DMR y comunicarse a través de la red es necesario obtener la licencia de operación y conseguir el ID DMR Y callsing para poder registrarse en la red.

- ***Radioafición***

Es una comunicación que se basa en el uso de repetidores para ampliar el alcance de la comunicación. Estos repetidores están conectados a internet, lo que crea una red global que permite a los radioaficionados comunicarse con personas de todo el mundo.

- ***Talkgroups***

Las conversaciones en la red DMR se organizan en "grupos de conversación" o talkgroups en donde los usuarios pueden unirse a conversaciones específicas sobre temas a través de la red Brandmeister.

b. D-STAR

D-STAR es un protocolo de comunicación digital estandarizado reconocido en los planes de bandas de radioaficionados. Es uno de los modos de voz y datos digitales más utilizados por los radioaficionados en todo el mundo [37].

Dado que la voz digital incorpora modulación GMSK con corrección de errores hacia adelante de AMBE™, el resultado es un audio nítido e inteligible con claridad digital utilizando solo 6 kHz de ancho de banda ocupado*. Proporciona un audio más claro que el modo FM analógico sin aumentar, por lo general, el nivel de ruido blanco en los límites del rango de comunicación [37].

c. YAESU SYSTEM FUSION

System Fusion es la implementación de Yaesu de la radioafición digital, que utiliza la tecnología FSK de 4 niveles C4FM para transmitir voz y datos digitales en las bandas de radioaficionados. A principios de la década de 2000, GMSK se consolidó como el modo digital dominante en el mercado de la radioafición, que rápidamente se convirtió en el formato digital predominante en la radioafición gracias a su calidad, fiabilidad y rendimiento superior en una amplia gama de entornos [38].

Los modos de comunicación digital han ganado popularidad en el mercado a lo largo de los años debido a su rendimiento superior en entornos con interferencias, ruido y otros factores que degradan la calidad de una señal analógica FM estándar. El menor ancho de banda y la necesidad de un mayor espectro han impulsado el desarrollo de la tecnología de comunicaciones digitales, ampliamente adoptada en los sectores de seguridad pública y empresas privadas que utilizan radios bidireccionales [38].

Para el desarrollo del presente proyecto se da énfasis al sistema de transmisión digital basado en Dvswitch ya que es una tecnología correspondiente a sistemas de transmisión digitales y ofrece entornos flexibles. A diferencia de la radiodifusión comercial que es dirigida a transmisiones unidireccionales de audio analógico, Dvswitch integra protocolos y tecnología de codificación AMBE, la cual optimiza y mejora la compresión de audio para recibir y mantener la calidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema digital de transmisión sonora para radiodifusión FM utilizando hardware libre en la Carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los principios de funcionamiento, estructura y parámetros técnicos de sistemas de transmisión sonora de radiodifusión FM digital.
- Construir un prototipo modular de sistema digital de transmisión sonora de radiodifusión FM utilizando hardware libre, estructurado en bloques funcionales escalables.
- Validar el prototipo modular mediante pruebas prácticas y material demostrativo para su uso en ferias y actividades formativas de la carrera de Telecomunicaciones.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El desarrollo del presente proyecto de investigación se desarrolló en dos partes. La primera el desarrollo del sistema digital en el cual se utiliza una Raspberry Pi 3 como dispositivo hardware en la cual se almacenará toda la instalación y configuración de dvswitch server y GNURadio. A continuación, se utiliza un dispositivo smartphone y se instala dvswitch Mobile, se configura y se realiza la transmisión de audio.

Para la segunda parte del proyecto, se realiza una transmisión FM sonora utilizando GNURadio como software para establecer los diagramas de bloques de transmisión y recepción FM. Dos dispositivos USRP para transmitir y recibir audio con la utilización de antenas Vert2450 de tipo dipolo con polarización lineal para trabajar en frecuencias correspondientes a FM en entornos controlados para no tener problemas con la trasmisión.

Para visualizar el funcionamiento se genera una interfaz gráfica para monitorear que el envío de audio de Dvswitch sea adecuado. En la transmisión en GNURadio se generan gráficas para visualizar el espectro y la frecuencia a la cual se está realizando la transmisión. La Figura 18 muestra el diagrama de flujo de desarrollo del proyecto de investigación.

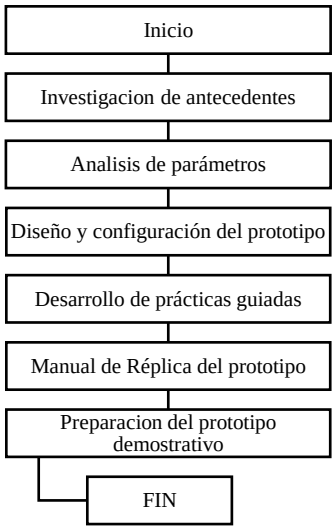


Figura 18. Diagrama de flujo del proyecto de investigación.

2.2 Métodos

El presente proyecto presenta una metodología Scrum basada en entornos académicos. Inicia con la instalación y configuraciones del sistema en la Raspberry Pi integrando hardware de libre acceso para su posterior prueba de funcionamiento y verificación de resultados.

2.2.1 Modalidad de la investigación

En el presente proyecto se utilizó una investigación aplicada ya que se orienta hacia el diseño de un sistema digital de transmisión utilizando hardware y software compatibles con SDR los mismos que se encuentran en los laboratorios de la facultad FISEI. Además, se emplean conocimientos adquiridos en la carrera de Telecomunicaciones en el área de comunicaciones, así como conceptos generales de los sistemas digitales, técnicas y características de la modulación y codificación de datos, los cuales aportan de manera significativa para el desarrollo del prototipo de un sistema digital de transmisión sonara de radiodifusión FM.

Se implementó una investigación bibliográfica documental basada en comunicaciones. Este tipo de investigación se centra en la recopilación y análisis de datos obtenidos en investigaciones, artículos, libros e internet con el propósito de obtener información que contribuyan al proyecto a realizar.

Por otra parte, se lleva a cabo una investigación experimental ya que se desarrollan prácticas de laboratorio con fines demostrativos y fortalecimiento de conocimientos hacia los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

2.2.2 Población y muestra

En el presente proyecto, no se considera necesario el uso de población y muestra, debido a que el enfoque principal es tecnológico. El objetivo del trabajo es diseñar, implementar y probar un sistema de radiodifusión FM digital a través de herramientas de hardware y software libre, evaluando su funcionamiento mediante pruebas técnicas

controladas. Por tanto, al no involucrarse directamente factores sociales, poblacionales o muestrales, no es pertinente aplicar técnicas de muestreo ni establecer una población.

2.2.3 Recolección de información

Para la recolección de información se utilizaron fuentes basadas en libros, fuentes de internet, proyectos académicos y artículos. A continuación, se presenta la Tabla 7 en donde se explica la organización de la recolección de información.

Tabla 7. Recolección de información.

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Para desarrollar un prototipo de un sistema digital de transmisión sonara de radiodifusión FM con hardware libre.
¿De qué personas u objetos?	Información de proyectos y artículos académicos revisados previamente y componentes necesarios.
¿Cómo?	A través de análisis de información y recolección de datos relacionados al proyecto, así como revisiones bibliográficas, diseño electrónico, configuraciones en software y evaluación de resultados.
¿Con qué?	Utilizando herramientas para recolectar información como bases de datos y repositorios, fichas técnicas de componentes y software para la transmisión FM.
¿Cuándo?	En el periodo académico Agosto 2025 – Enero 2026
¿Donde?	En los laboratorios de la facultad FISEI de la Universidad Técnica de Ambato

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se desarrollará a través de una serie de pasos a continuación:

- Recolección de información y datos obtenidos acerca de sistemas digitales de trasmisión FM.
- Análisis de hardware de los módulos SDR.
- Selección de componentes electrónicos tanto software como hardware libre.

- Desarrollo esquemático y físico del prototipo del sistema digital de transmisión FM.
- Validación del prototipo a través de pruebas de funcionamiento.
- Elaboración de prácticas guiadas y manual técnico para el correspondiente uso.
- Presentación de resultados.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Revisión bibliográfica de sistemas digitales FM y tecnología SDR

La evolución de los sistemas de comunicación ha dado lugar a la integración de tecnologías digitales sobre plataformas flexibles como la radio definida por software (SDR). En este contexto, la modulación de frecuencia (FM), tradicionalmente analógica, ha sido adaptada a entornos digitales para aplicaciones como voz comprimida, telemetría y transmisión de datos en tiempo real.

3.1.1 Sistemas Digitales FM

La modulación FM digital se basa en la codificación de voz (AMBE) seguida de una modulación analógica o digital. En el transcurso del tiempo se han desarrollado sistemas receptores FM utilizando HackRF y GNU Radio**,** validando su funcionamiento en plataformas como Raspberry Pi y Ubuntu. Este enfoque permite integrar FM en redes digitales, como DVSwitch, donde la voz se transmite por IP y se modula para pruebas físicas [39].

3.1.2 Tecnología SDR

La SDR permite implementar funciones de transmisión y recepción mediante software, eliminando la necesidad de hardware dedicado para cada tipo de modulación. El uso de GNU Radio y HackRF One ha demostrado ser eficaz para el diseño de sistemas digitales FM, permitiendo la simulación, modulación y análisis de señales en tiempo real [40].

En investigación desarrolladas se destaca que la SDR, combinada con hardware libre como RTL-SDR y USRP, facilita la recepción de señales AM, FM, promoviendo entornos accesibles [40].

En la tabla Tabla 8 se describe las aplicaciones y ventajas clave de las plataformas y tecnologías que utilizan SDR.

Tabla 8. Plataformas y tecnologías SDR

Plataforma / Tecnología	Aplicación principal	Ventajas clave
GNU Radio	Diseño y simulación SDR	Modular, visual, compatible con USRP
HackRF One	Transmisión y recepción SDR	Económico, versátil, buena cobertura RF
USRP B200/B210	SDR profesional	Full-duplex, alta fidelidad
DVSwitch + AMBE	Voz digital sobre IP	Compresión eficiente, interoperabilidad

3.2 Identificación de parámetros clave: rango de frecuencias, SNR, BER, modulación digital aplicable.

En el desarrollo del sistema SDR para transmisión digital de voz, se han identificado los siguientes parámetros técnicos como fundamentales para garantizar la calidad, eficiencia y compatibilidad del sistema. Estos parámetros permiten evaluar el desempeño del sistema de transmisión sonora.

3.2.1 Rango de frecuencias

Para la primera parte del sistema de transmisión sonora se utiliza una comunicación digital de VoIP con lo cual el rango se establece de acuerdo a la red de área local (LAN).

Para la segunda parte del sistema, se recomienda el desarrollo de una transmisión sonora FM dentro del rango de banda libre ISM (433 MHz) para pruebas de funcionamiento y no interferir con bandas comerciales. Sin embargo, en entornos controlados es posible transmitir en bandas correspondientes a FM que en este caso se utiliza la banda de 88-108 MHz.

3.2.2 Identificación de SNR y BER

El SNR es la medida de la calidad de la señal recibida respecto al ruido de fondo. Se expresa en decibelios (dB). En el desarrollo del proyecto se espera un SNR mínimo aceptable de ~10 dB para que exista una decodificación funcional.

La tasa de error de bit (BER) proporción de bits erróneos respecto al total transmitido. Además, es un indicador de rendimiento digital del sistema de transmisión. Un BER

ideal correspondería a $<10^{-5}$ en condiciones óptimas. Para verificar se realizan pruebas de funcionamiento entre la transmisión y la recepción de información.

3.2.3 Modulación Digital Aplicable

En el desarrollo del proyecto se aplica una técnica de modulación para representar los datos digitales sobre la portadora analógica. La técnica utilizada es NBFM (Narrowband Frequency Modulation) ya que se aplica sobre datos digitales codificados, en este caso el sonido capturado por el micrófono y que es ideal para transmisiones de voz. Para Dvswitch se utiliza codificación AMBE orientada específicamente para transmisiones de audio por su alta fiabilidad y calidad.

3.3 Análisis comparativo de arquitecturas SDR y hardware libre compatible.

Las arquitecturas SDR permiten implementar funciones de transmisión y recepción de señales mediante software, sobre hardware genérico o especializado. El uso de plataformas y hardware libre resulta beneficioso por su flexibilidad, bajo costo y un entorno amigable de entendimiento accesible.

A continuación, se presenta un análisis comparativo entre arquitecturas SDR en la Tabla 9.

Tabla 9. Arquitecturas SDR

Plataforma	**Lenguaje / Entorno**	**Características Clave**	**Ventajas**	**Limitaciones**
GNU Radio	Python + C++ (GRC)	Entorno gráfico modular, bloques DSP, soporte USRP, RTL-SDR, HackRF	Comunidad activa, visual, flexible, ideal para prototipos	Curva de aprendizaje, requiere configuración manual
srsRAN (antes srsLTE)	C++ + scripts Bash	Arquitectura LTE/5G completa, stack RAN y EPC, integración con USRP	Ideal para redes móviles, documentación sólida	Requiere hardware potente, configuración compleja
OpenAirInterface (OAI)	C/C++ + Docker	Plataforma 4G/5G completa, soporte para MIMO, slicing, integración con Open5GS	Escalable, orientada a investigación 5G	Mayor complejidad, menos amigable para principiantes
Pothosware + SoapySDR	C++ + GUI	Framework modular para DSP, compatible con múltiples SDRs.	Ligero, flexible, buena integración con hardware	Menor cantidad de bloques listos para voz digital

Con el análisis de las arquitecturas SDR se optó por la plataforma de GNURadio ya que tiene un lenguaje de programación familiarizado, un entorno grafico modular y que tiene soporte para hardware libre como USRP.

Por otra parte, se utiliza Raspberry Pi ya que es hardware libre compatible para la utilización de dvswitch y del mismo modo con GNU Radio ya que al ser Open Source permite la documentación y replicabilidad.

3.4 Selección de bloques funcionales: módulo codificación digital, módulo de modulación FM, módulo transmisión RF.

En el presente proyecto se ha implementado una arquitectura SDR orientada a la transmisión digital de voz mediante Dvswitch, integrando módulos funcionales que responden a las etapas clásicas de un sistema de comunicación.

3.4.1 Módulo Codificación Digital

Este módulo se encarga de convertir la señal de voz analógica en datos digitales comprimidos, optimizados para su transmisión por red IP. Además, representa la etapa de codificación de fuente.

El módulo de codificación se muestra en la Figura 19 el cual indica el diagrama de bloques utilizado. El proceso empieza por el bloque Dvswitch mobile el cual captura la voz desde el dispositivo móvil para luego transportar la voz por paquetes a través de Analog-Brigde instalado en la Raspberry Pi y decodificando el audio digital. Utiliza un modo de codificación AMBE comúnmente utilizado en estos enlaces por su alto nivel de calidad de transmisiones de audio.



Figura 19. Diagrama de bloques del Módulo de Codificación [30].

3.4.2 Módulo de Modulación FM

Este módulo transforma los datos digitales en una señal analógica modulada en frecuencia para poder transmitirla hacia un receptor FM. El módulo se realiza en GNURadio en el cual se integra el bloque Audio Source que captura el audio detectando el dispositivo de entrada (micrófono), el bloque NBFM correspondiente a FM junto con USRP TX para la respectiva transmisión de la señal modulada. A continuación, se muestra la Figura 20 correspondiente al módulo de modulación FM.

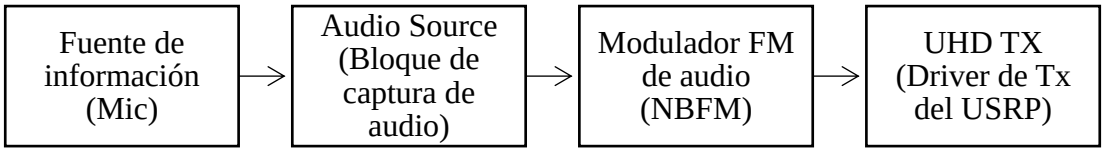


Figura 20. Módulo de Modulación FM [30].

3.4.3 Módulo de Transmisión RF

Este módulo permite la propagación de la señal FM modulada a través del medio, permitiendo la transmisión y recepción de la señal de audio. La tecnología que se utiliza es SDR en donde la señal es enviada a través de un canal físico o inalámbrico. El módulo consta de la implementación del bloque USRP TX para la transmisión y el bloque USRP RX para la respectiva recepción como se muestra en la Figura 21.

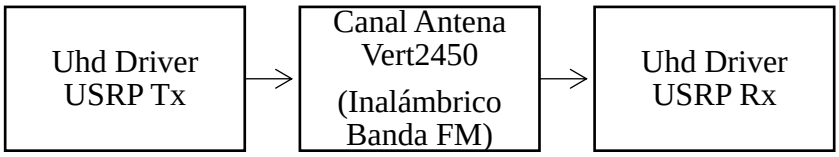


Figura 21. Módulo de Transmisión RF [41].

Principio de funcionamiento del sistema de transmisión FM y Digital.

La tabla 10 presentada permite identificar claramente las diferencias y similitudes entre los sistemas de transmisión FM analógicos y digitales

Tabla 10. Principio de funcionamiento de sistemas de transmisión FM y Digital.

Tipo de Sistema	**Principio de funcionamiento**	**Estructura general del sistema**	**Parámetros técnicos característicos**
Radiodifusión FM analógica	La información de audio modula la frecuencia de una portadora RF, variando su frecuencia instantánea de acuerdo con la amplitud de la señal de audio	Fuente de audio Modulador FM Antena transmisora Canal Receptor FM Audio	Frecuencia portadora: 88–108 MHz, desviación máxima: ±75 kHz, ancho de banda: ≈200 kHz, relación señal/ruido
Sistema de transmisión sonora digital	La señal de audio es muestreada, cuantificada y codificada digitalmente antes de ser modulada sobre una portadora.	Fuente de audio Conversión A/D Procesamiento digital Modulación digital Transmisor RF Canal Receptor Demodulación Procesamiento digital	Frecuencia de muestreo: 44.1–48 kHz, resolución: 16 bits, tasa de bits variable, mayor inmunidad al ruido Codificación Digital: AMBE
Sistema FM implementado con GNU Radio y USRP	El audio es procesado digitalmente y modulado en frecuencia mediante bloques DSP, generando una señal FM.	Audio Source Filtros digitales Modulador NBFM USRP Sink Canal USRP Source Demodulador NBFM Audio Sink	Frecuencia de muestreo: 48 kHz, desviación máxima: 5 kHz, frecuencia central: 97 MHz, FFT size: 1024, ancho de banda de visualización: 48 kHz

3.5 Diseño esquemático y físico del prototipo, incluyendo diagramas de bloques.

3.5.1 Diagrama físico del Sistema de Transmisión Digital.

Este sistema representa una arquitectura que combina transmisión digital sobre IP con modulación en FM, integrando componentes SDR y herramientas DVSwitch. Su diseño modular permite escalar hacia redes IoT, donde cada nodo puede actuar como transmisor, receptor o monitor. Además, el uso de USRP y Raspberry Pi facilita la experimentación y documentación técnica para prácticas reproducibles en telecomunicaciones tal como se observa en la Figura 22.

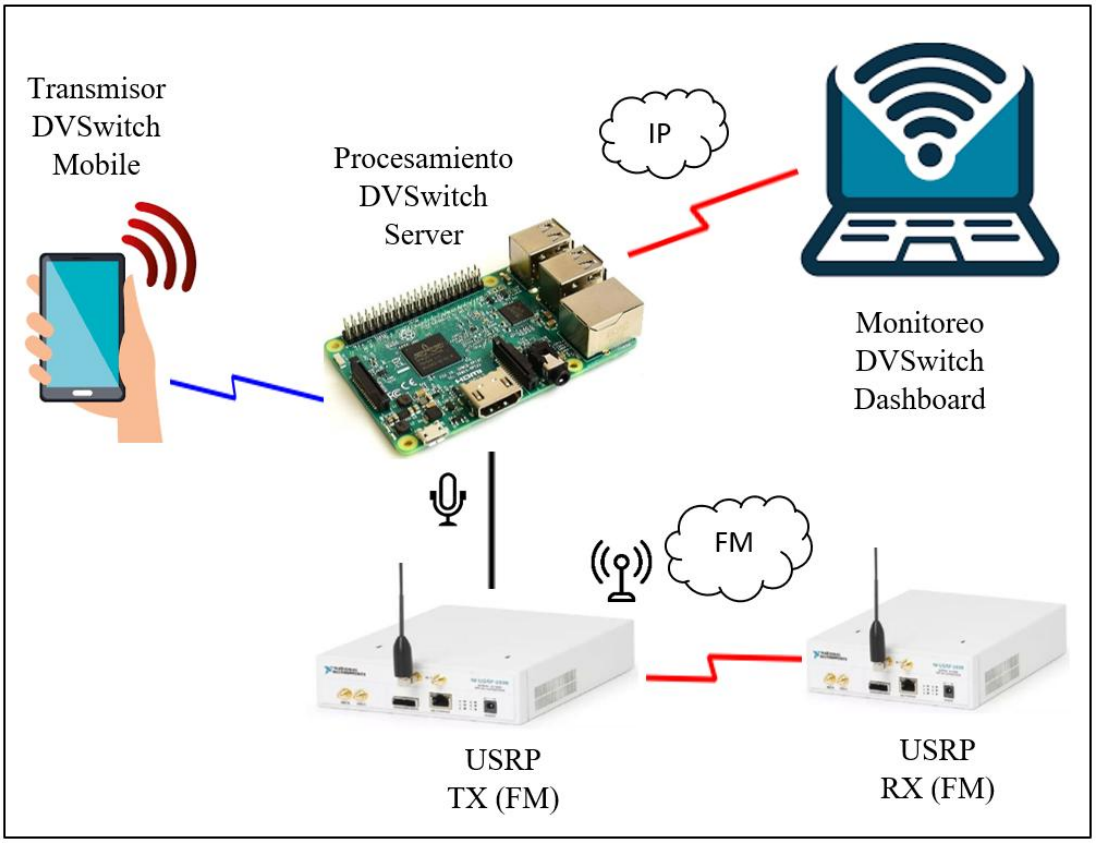


Figura 22. Diagrama físico del Sistema de Transmisión.

3.5.2 Diagrama de Bloques del Sistema

El sistema ilustrado en el diagrama de la Figura 23 representa una arquitectura de comunicación digital basada en DVSwitch, que integra transmisión móvil,

procesamiento IP y modulación mediante SDR. Un dispositivo móvil (smartphone) con la aplicación DVSwitch Mobile captura audio del usuario, lo codifica digitalmente, en formato AMBE y lo transmite vía red IP al servidor DVSwitch. El servidor (Raspberry Pi) recibe el audio digital, lo decodifica y lo enruta. Este procesamiento puede incluir:

- Utilización de redes digitales (DMR).
- Envío de datos al dashboard para monitoreo.

Una laptop conectada por IP al servidor permite visualizar en tiempo real la actividad del sistema como transmisiones, estado de red, rendimiento del hardware y calidad del audio. Además, el servidor envía el audio procesado con un transductor de entrada (mic) a un transmisor SDR (USRP TX), que modula la señal en FM y la transmite por radiofrecuencia. Para finalizar, un receptor SDR (USRP RX) capta la señal FM transmitida, permitiendo validar la calidad de la transmisión.

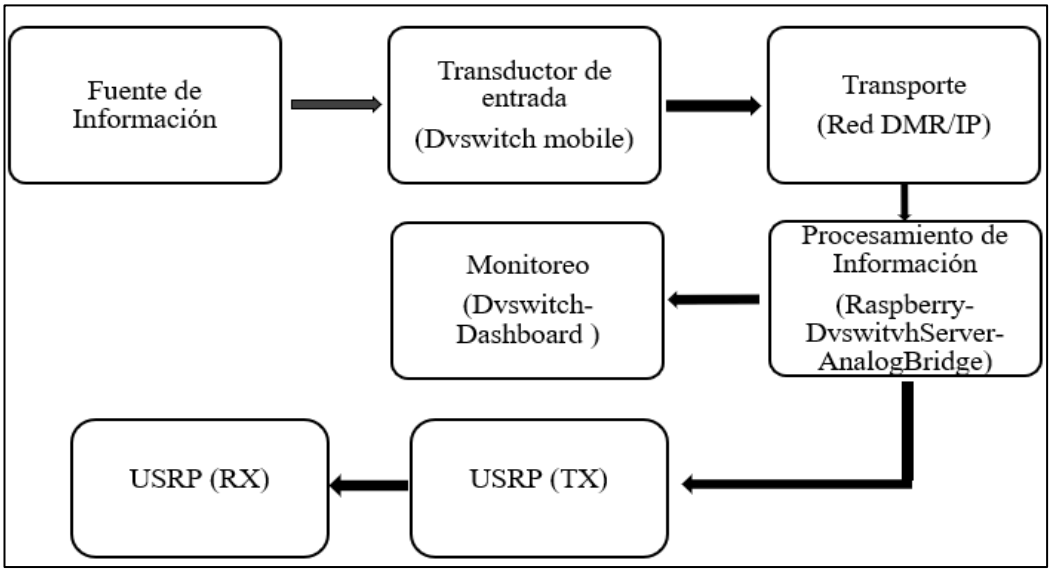


Figura 23. Diagrama de bloques del Sistema de Transmisión.

3.5.3 Arquitectura del Sistema

a. Arquitectura Lógica del Sistema

El sistema de Transmisión Digital se encuentra basado en el modelo de referencia de arquitectura IoT (UIT-T Rec. Y.2060) [42] en el cual se puede observar cuatro capas las cuales se detallan en la Figura 24.

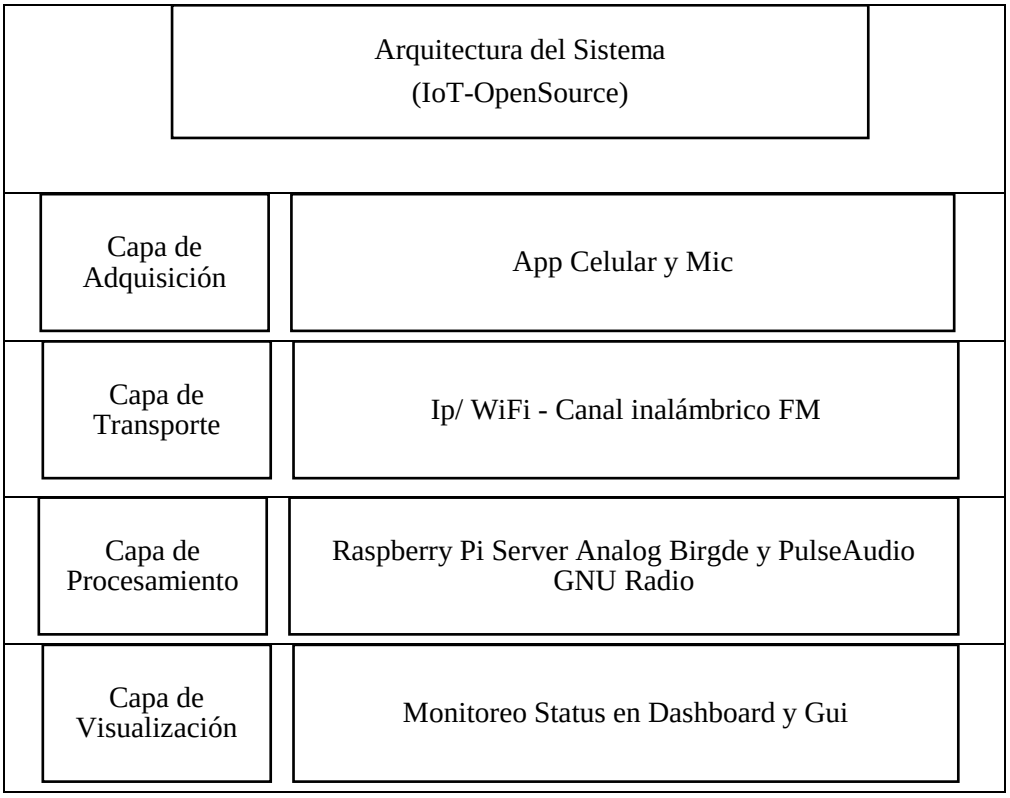


Figura 24. Arquitectura lógica del Sistema de Transmisión Digital.

b. Arquitectura Funcional del Sistema

La arquitectura del sistema propuesto se encuentra basado en cuatro etapas las cuales son: etapa de adquisición, etapa de procesamiento, etapa de transporte y etapa de visualización. En la etapa de adquisición se encuentra el dispositivo móvil y micrófono los cuales se encargan de capturar el audio para ser enviado y procesado. La etapa de procesamiento se encarga de todas las configuraciones realizadas en la Raspberry Pi para el sistema digital. Por otra parte, se utiliza GNU Radio para desarrollar los bloques y transmitir el audio FM a través del aire utilizando el dispositivo USRP. En la etapa de transporte se detalla la forma en que el audio será enviado utilizando direccionamiento IP y WiFi para voz Digital y Banda de radiodifusión FM utilizada

para GNU Radio. Finalmente, en la etapa de visualización se observa el estatus y monitoreo de la transmisión de audio a través de Dashboard en Dvswitch y además utilizando guis en GNURadio se visualiza la frecuencia, el espectro y diagrama de constelación utilizado en la transmisión de audio FM. En la Figura 25 se visualiza la arquitectura funcional el sistema de transmisión.

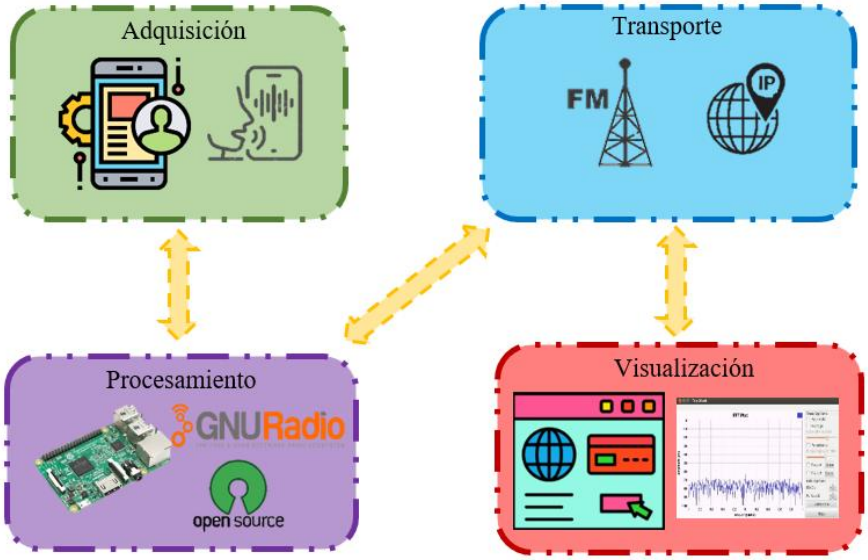


Figura 25. Arquitectura Funcional del Sistema.

3.6 Implementación y configuración del hardware (SDR) y software (GNU Radio).

3.6.1 Implementación del sistema

Se utiliza la aplicación móvil Dvswitch para enviar el audio a través de un celular el cual a traves de Analog-Bridge se conecta hacia el dvswitch server que se encuentra instalado en la Raspberry pi. En la Raspberry Pi se encuentra toda la configuración del sistema para luego verificar la recepción en una interfaz gráfica de dvswitch.

En la Figura 26 se visualiza un diagrama de bloques que indica el proceso de transmisión digital de sonido.

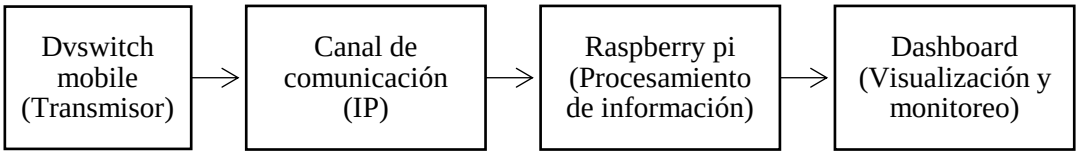


Figura 26.Transmisión Digital de Audio.

A continuación, se realiza el proceso de transmisión de sonido en FM utilizando GNURadio en el cual como transductor de entrada se optó por el uso de un micrófono conectado a la Raspberry pi para capturar la voz. En la Raspberry pi se instala GNURadio y se generan los bloques para realizar el proceso de transmisión de sonido en FM.

Para la recepción se utiliza una laptop con GNURadio en donde se generan los bloques correspondientes a la parte de recepción de sonido. En la Figura 27 se visualiza el proceso de transmisión y recepción de sonido.



Figura 27. Proceso de transmisión y recepción FM de sonido con usrp.

3.6.2 Configuración de Dvswitch Mobile

Para la primera parte del sistema de transmisión se realiza la configuración del sistema de transmisión en la aplicación Dvswitch Mobile con los parámetros adecuados correspondientes a audio digital. En la Tabla 11 se muestran los parámetros correspondientes para la configuración en Dvswitch Mobile.

Tabla 11. Configuración Dvswitch Mobile

Parámetro	Descripción
Protocolo	USRP
Hostname	Ip del servidor
Port	Puerto de enlace
Callsing	Indicativo
DMR ID	Código ID

3.6.3 Configuración de Dvswitch Server

En esta sección se realiza el proceso de configuración el cual se encarga de capturar el audio de Dvswitch Mobile y lo procesa para luego poder verificar que la recepción sea adecuada.

Abrimos el terminal e ingresamos el comando dvs en el cual se abrirá una ventana como se muestra en la Figura 28 para poder configurar dvswitch server

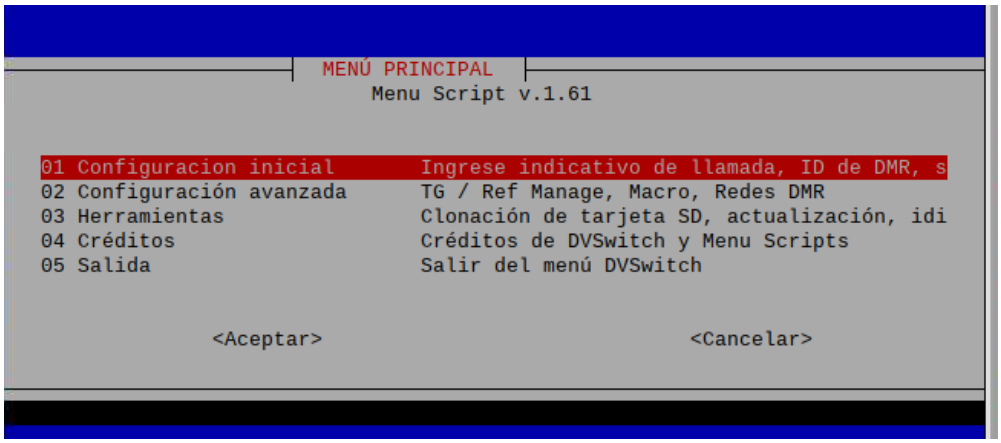


Figura 28. Menú principal de configuración.

La Tabla 12 muestra los parámetros que se deben ingresar para realizar la respectiva configuración.

Tabla 12. Configuración Dvswitch server

Parámetro	Descripción
Calling	TESTNODE
DMR ID	9999999
DMR ID+2 Dígitos (00-99)	999999911
Dstar módulo	B (Hostpot)
USRP Port	52200

3.6.4 Configuración de GNURadio

Se realiza la configuración correspondiente a la transmisión y recepción FM de audio añadiendo los bloques que se utilizaran para el desarrollo del sistema.

- ***Audio source:***

Es el bloque que se encarga de tomar el audio del micrófono conectado al dispositivo. Se coloca un valor de 48KHz en sample rate debido a que es el valor con el que capturan audio las tarjetas de sonido. En device name se coloca default para que GNU Radio detecte y utilice automáticamente el micrófono conectado.

Para justificar el valor de 48 k utilizado en el sample rate se toma en cuenta el criterio de Nyquist el indica que para digitalizar una señal analógica sin perder información, la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la frecuencia máxima de la señal. La ecuación 1 muestra la fórmula de Nyquist [24].

$$\boldsymbol{fs \geq 2 * fmax} \quad (1)$$

fs: frecuencia de muestreo

fmax: frecuencia máxima de la señal

El oído humano percibe hasta 20KHz lo cual aplicando Nyquist el valor aproximado es de 48KHz cubriendo el rango audible de audio.

- ***Multiply Const:***

Este bloque multiplica la señal por un valor constante. Se utiliza un valor de 2 para aumentar el nivel de la señal de audio.

- ***Rational resampler:***

Ajusta la tasa de muestreo de la señal (48KHz – 96KHz).

- ***High Pass Filter:***

Elimina frecuencias bajas no deseadas asi como el ruido, viento, etc. El valor es de 15 Hz debido a que debajo de ese valor existe ruido considerable en los micrófonos.

- ***Low Pass Filter:***

Permite el paso de frecuencias dentro del rango de voz. El rango de voz es de 3-5khz.

- ***NBFM:***

El bloque permite tomar el audio, modularlo en frecuencia y producir una señal compleja IQ para transmitirla.

- ***UHD Usrp Sink:***

Recibe la señal modulada para poder transmitirla por la antena de forma inalámbrica.

En la Figura 29 se observan los bloques utilizados para la transmisión de audio.

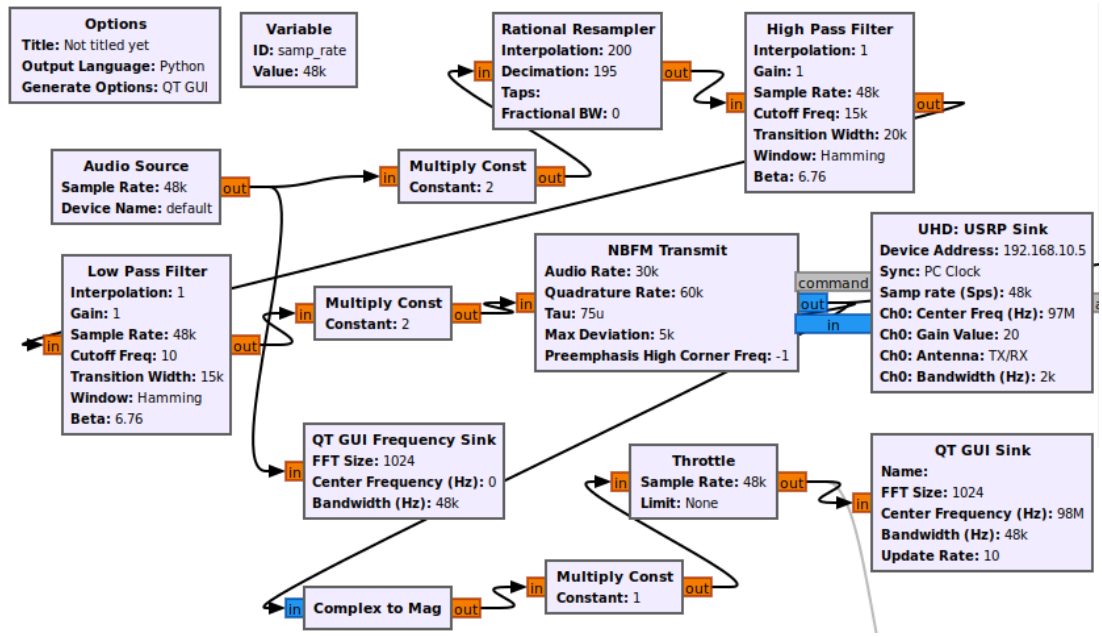


Figura 29. Bloques de transmisión

Los parámetros y bloques utilizados en la primera parte de la configuración correspondiente a la transmisión se mencionan en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros de configuración de la transmisión.

Bloque	**Descripción**
Variable	Sample Rate: 48KHz
Audio Source	48k
Multiply Const	2
Rational resampler	Interpolation: 200 Decimation: 195
High Pass Filter	Frecuencia de corte: 15Hz Sample Rate: 48 KHz
Low Pass Filter	Frecuencia de corte: 10KHz Sample Rate: 48 KHz
NBFM	Audio Rate: 30K Quadrature Rate: 60K
UHD Usrp Sink	Device Address: 192.168.10.5 Frecuencia: 98KHz Ganancia: 20 dB Bandwidth: 2Khz

Del mismo modo para la recepción se generan los bloques correspondientes. El sistema de transmisión utiliza bloques entre los cuales se mencionan a continuación:

- ***UHD Usrp Source:***

Bloque encargado de recibir la señal RF desde la antena transmisora. Sintoniza la frecuencia con la que se envió el audio.

- ***NBFM Receive***

Demodula la señal de FM transmitida en audio.

- ***Rational Resampler***

Ajusta la tasa de muestreo para la voz (48k)

- ***Multiply const***

Multiplica el audio para ajustar el nivel de señal.

- ***Audio Sink***

Reproduce el audio transmitido por la señal emisora.

- ***FFT Size***

Corresponde al número de muestras estandarizado (1024) que utiliza FFT para calcular el espectro. Si se coloca un número mayor, existirá más detalle en el espectro. Si se coloca menos muestra el grafico será menos preciso.

Los bloques utilizados para la parte de recepción se muestran en la Figura 30.

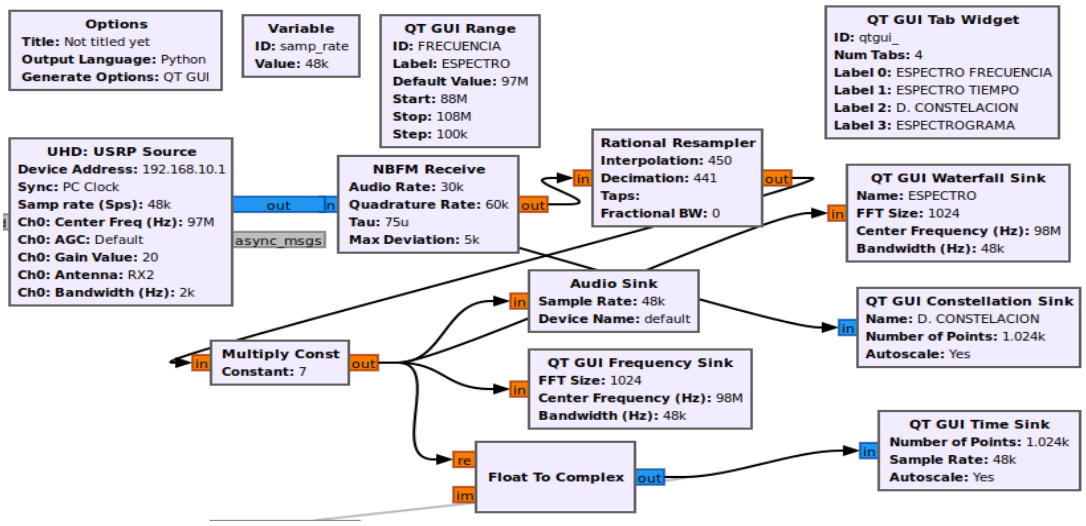


Figura 30. Bloques de recepción del sistema.

A continuación, se lista los valores de los parámetros utilizados para el receptor en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de configuración del receptor.

Bloque	Descripción
UHD: USRP SOURCE	Device Address: 192.168.10.1 Sample Rate: 48K Frecuencia: 97 MHz Ganancia: 20dB Bandwidth: 2KHz
NBFM Receive	Audio Rate: 30K Quadrature Rate: 60K Max Desviation: 5K para FM
Rational Resampler	Interpolation: 48 Decimation: 30
Multiply const	7
Audio sink	Sample rate: 48k Device name: Default
QT GUI Frequency	FFT Size: 1024 Center Frequency: 98 MHz

3.7 Validación del prototipo mediante mediciones de calidad de señal (espectro).

3.7.1 Transmisión en Dvswitch Server

Para la validación del sistema se desarrolla una tabla comparativa en el cual se realizan pruebas de transmisión de audio a través de Dvswitch Mobile y visualizar el estado de transmisión en la interfaz gráfica que proporciona Dvswitch.

A continuación, se presenta la Tabla 15 que indica los parámetros a considerar para la transmisión digital de sonido y los tiempos de latencia.

Tabla 15. Cuadro comparativo de la transmisión en Dvswitch

Método de Transmision	Distancia de envío (m)	Duración (s)	Tiempo de RX en Dashboard	Estado
PTT	10	5s	< 150ms	Estable
PTT	20	5s	< 150ms	Estable
PTT	40	5s	< 150ms	Estable
PTT	60	5s	< 150ms	Poco estable
PTT	80	5s	< 150ms	Poco estable

Como se puede observar la Tabla 15 muestra una latencia inferior a 150ms lo cual es aceptable ya que se encuentra dentro del rango establecido por la UIT-T G.114 para voz digital [43]. La transmisión se realiza en un rango correspondiente a una red de área local, sin embargo, mientras más distancia existe entre el transmisor y el receptor, existirá una mayor latencia en el audio.

Las pruebas se realizan utilizando el modo DMR con modulación 4-FSK utilizado para mejorar la calidad de la señal transmitida y maximizar la eficiencia espectral frente a interferencias.

Parámetros de 4-FSK

Velocidad de símbolo: 4800 baudios

Bits por símbolo: 2 bits

Ancho de banda ocupado: 12,5 KHz

Cálculo de la eficiencia espectral

La ecuación 2 muestra el análisis del cálculo de la eficiencia espectral correspondiente a 4-FSK [24].

$$\boldsymbol{n = \left(\frac{Rb}{B}\right)}$$
$$\boldsymbol{n = \left(\frac{9600}{12500}\right) = 0,768\ bits} \quad (2)$$

donde *Rb* representa a la tasa de bits en bits por segundo y *B* corresponde al ancho de banda ocupado en Hertz.

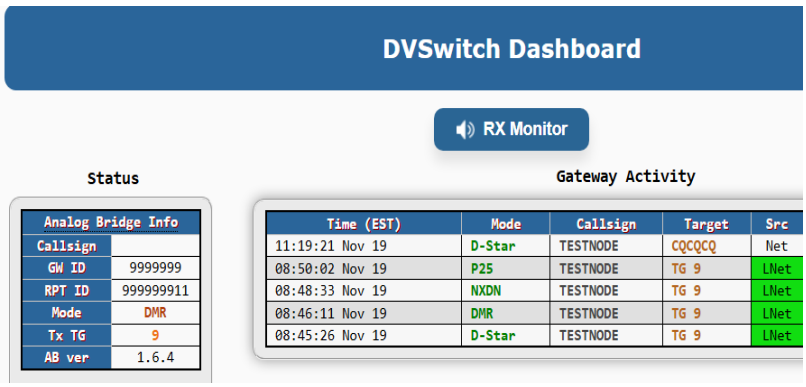


Figura 31. Modos de transmisión en Dvswitch

La Figura 31 muestra el Dashboard correspondiente al monitoreo de la transmisión en Dvswitch en el cual se puede observar ciertos parámetros importantes, así como el status, la actividad Gateway que transmite en diferentes modos como D-star, P25, NXDN Y DMR.

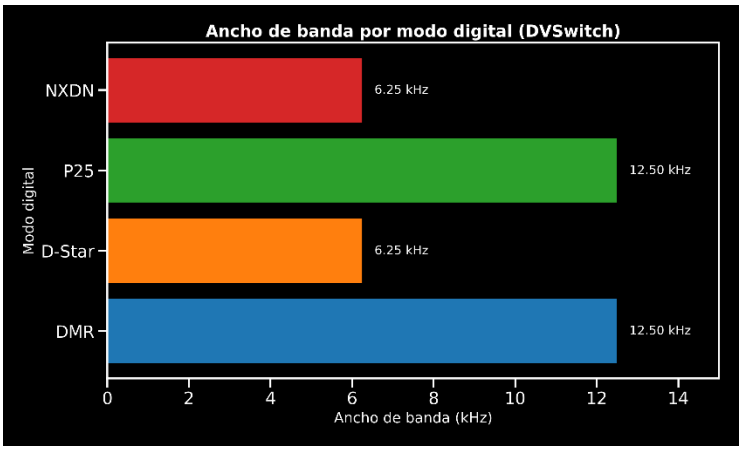


Figura 32. Ancho de banda de los modos digitales en Dvswitch

La Figura 32 muestra el ancho de banda aproximado que cada modo digital ocupa en el espectro de radiofrecuencia. Para DMR (Digital Mobile Radio) un ancho de banda de 12.5 kHz y utiliza modulación 4FSK y acceso TDMA. Para P25 (Project 25), 12.5 kHz y usa modulación C4FM. D-Star con 6.25 kHz, utiliza modulación GMSK y ocupa menos ancho de banda, lo que lo hace más eficiente en espectro. Por último, NXDN con 6.25 kHz de ancho de banda. También usa 4FSK, pero optimizado para

canales estrechos por lo que es muy eficiente en espectro usado en sistemas privados e industriales.

La gráfica deja claro que D-Star y NXDN son más eficientes en espectro. Sin embargo, DMR Y P25 son más robustos y utilizados para realizar transmisiones de audio con mayor calidad.

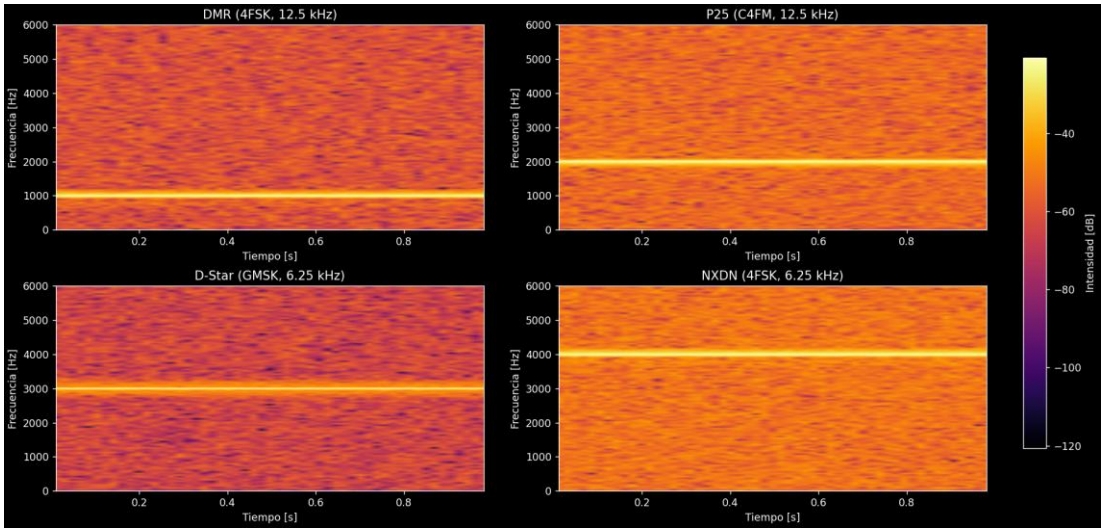


Figura 33. Ancho de banda de modos de transmisión en Dvswitch.

En la Figura 33 se muestra el espectrograma que indica la transmisión de sonido en los diferentes modos de transmisión en Dvswitch, cada uno con su respectivo ancho de banda y la intensidad en dB.

Análisis del BER

El análisis del Ber se realiza en la transmisión Digital con Dvswitch en la cual se establece el enlace a diferentes tiempos para calcular los bits enviados y recibidos para desarrollar el correspondiente cálculo. Para obtener estos datos se captura el audio de dvswitch con el comando:

sudo tcpdump -i wlan0 udp port 52200 -w captura_dvswitch.pcap

La ecuación 3 indica la fórmula que se utiliza para el cálculo del BER en el sistema digital de transmisión [24].

$$\mathbf{BER} = \left(\frac{\boldsymbol{Bits\ perdidos}}{\boldsymbol{Bits\ totales}}\right) \quad (3)$$

A partir de los bits obtenidos se puede realizar el cálculo del BER y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis del BER

Duración (s)	Bits Totales	Bits Perdidos	BER estimado (%)	Observaciones
10	115k	0k	0	Audio claro
30	250k	0k	0	Audio claro
60	359k	0,1k	0,0002	Audio aceptable
120	598k	0,1k	0,00016	Audio aceptable

Transmisión en GNURadio con USRP

Se realizan los diagramas en el entorno de GNURadio correspondientes a la transmisión FM en el cual se tomaron en cuenta ciertos parámetros, entre la más importante la frecuencia de transmisión. La frecuencia ideal es de 433 MHz debido a que es una frecuencia de banda libre utilizada para pruebas de funcionamiento y proyectos ya que utilizar otras frecuencias no es permitido y es ilegal según lo establecido por la Arcotel. Sin embargo, en entornos controlados es posible utilizar frecuencias correspondientes a FM con una potencia sumamente baja para no generar conflictos.

En la Figura 34 se muestra la señal de audio transmitida en GNURadio. La frecuencia utilizada es de 98 MHz la cual muestra el espectro en el dominio de la frecuencia.

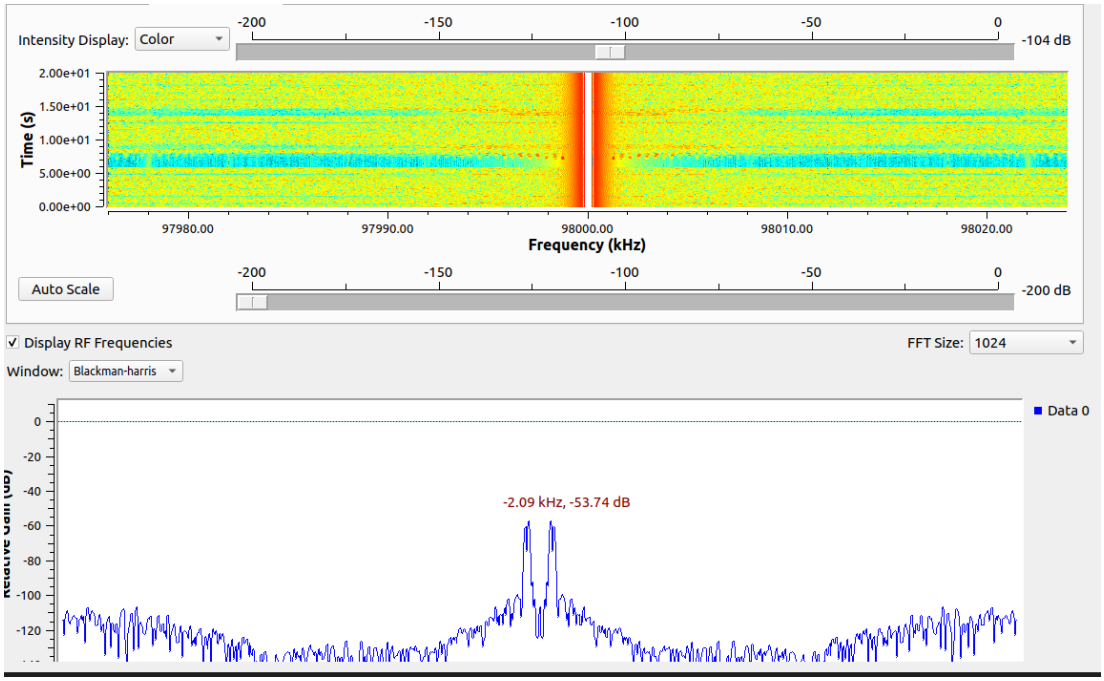


Figura 34. Señal de audio transmitida.

En la Figura 36 se puede apreciar la señal de audio recibida en función de la frecuencia y tiempo. Se observa que el audio transmitido llega al receptor, sin embargo, la señal es débil y presenta ruido. Presenta latencia considerable a diferencia de la transmisión digital desarrollada en Dvswitch que en contraste es más rápida y casi sin perdidas.

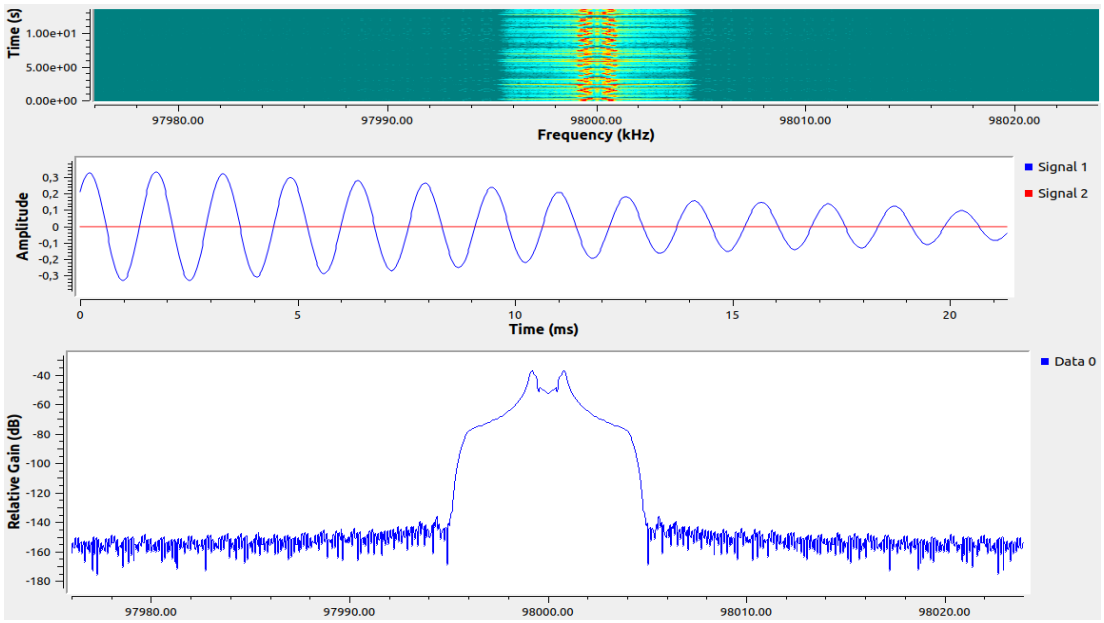


Figura 35.Señal de audio FM recibida.

En la Figura 36 se aprecia el diagrama de constelación correspondiente al audio transmitido en donde se puede apreciar que la fase varia continuamente formando una trayectoria curva que representa la evolución en fase. Además, se puede apreciar la existencia de ruido al momento de receptar el audio y que afecta directamente a la señal FM.

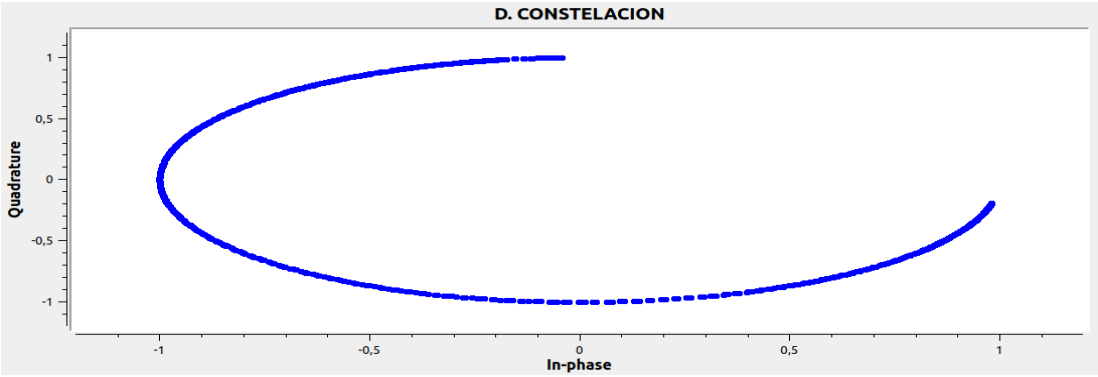


Figura 36. Diagrama de constelación en la recepción.

Análisis del SNR

En la transmisión de audio FM se realiza el análisis de la calidad audio a traves del cálculo del SNR lo cual permite verificar su validez y eficacia.

La ecuación 4 muestra la fórmula para calcular el SNR del sistema de transmisión FM [24].

$$\mathbf{SNR} = \mathbf{10}.\boldsymbol{log}_{\mathbf{10}}\left(\frac{\boldsymbol{Potencia\ Señal}}{\boldsymbol{Potencia\ Ruido}}\right) \quad (4)$$

En el sistema se obtiene la potencia de la señal y la potencia de ruido lo que permite establecer el cálculo del SNR del sistema. A continuación, se presenta la Tabla 17 correspondiente a los valores obtenidos del cálculo del SNR para la transmisión FM.

Tabla 17. Análisis SNR

Distancia (m)	Potencia señal	Potencia ruido	SNR (dB)	Observaciones
1	0.100	0.005	13.0	Señal con ruido normal
3	0.070	0.005	11.5	Señal con ruido considerable
7	0.030	0.005	7.8	Ruido perceptible

3.8 Diseño de prácticas guiadas: instalación, transmisión básica, medición espectral, comparación analógica vs digital.

Práctica Guiada N°1

1. Tema

Introducción a Dvswitch

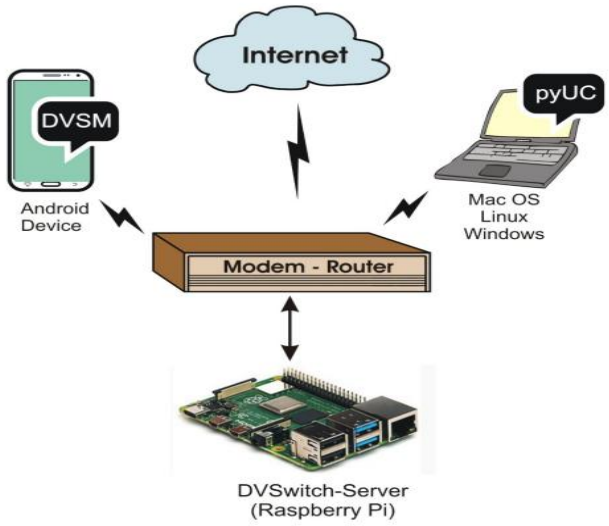
2. Objetivo

Desarrollar una guía de instalación del sistema operativo y dvswitch en la Raspberry Pi.

3. Procedimiento

3.1 Introducción

DVSwitch es una aplicación cliente-servidor para voz digital en radioaficionados. La aplicación proporciona un componente de servidor que se ejecuta en una Raspberry Pi (RPi) u otra plataforma Linux. También se puede instalar en un servidor en la nube con Linux. El componente de servidor se distribuye como una imagen de RPi con todas las características y funciones instaladas. Por lo tanto, no es necesario descargar ni instalar módulos o programas adicionales en una Raspberry Pi. DVSwitch cuenta con dos clientes disponibles.



3.2 Aspectos Importantes

Para poder realizar la instalación de dvswitch en la Raspberry pi se deben tomar en cuenta ciertos aspectos que serán necesarios para su correcto uso y funcionamiento.

- ***DMR ID***

Para operar en el sistema DMR, necesita registrarse en un sistema de autenticación (7 dígitos). En el caso académico se utiliza un código para pruebas controladas (9999999).

- ***Vocoder***

No se requiere un vocoder de hardware externo. El vocoder de software utilizado en el servidor Dvswitch es simulado para pruebas de funcionamiento.

- ***Raspberry Pi***

La Raspberry Pi 3 en adelante es recomendable para realizar este tipo de proyectos debido a que es necesario instalar el sistema operativo y algunas librerías que pueden afectar el funcionamiento de la Raspberry si no es la adecuada.

- ***MicroSD***

Se recomienda utilizar una microSD con capacidad superior a 16GB para instalar el sistema operativo y los paquetes.

3.3 Instalación de Dvswitch server en la Raspberry pi

En primer lugar, se necesita instalar la imagen del sistema operativo que se va a utilizar en la Raspberry Pi. Se utiliza el Raspios versión Bullseye ya que funciona con Dvswitch sin problemas.

Insertar la microSD con la imagen del sistema operativo y a continuación abrir el terminal para la instalación de dvswitch. Para ello es necesario conectar un monitor y teclado o instalarlo a través de SSH (Putty SSH).

En el terminal ingresar los siguientes comandos para la instalación de Dvswitch.

Realizamos actualizaciones:

sudo apt-get update

Descargamos el instalador dvswitch:

wget http://dvswitch.org/buster

Concedemos permisos:

sudo chmod +x búster

Ejecutamos búster:

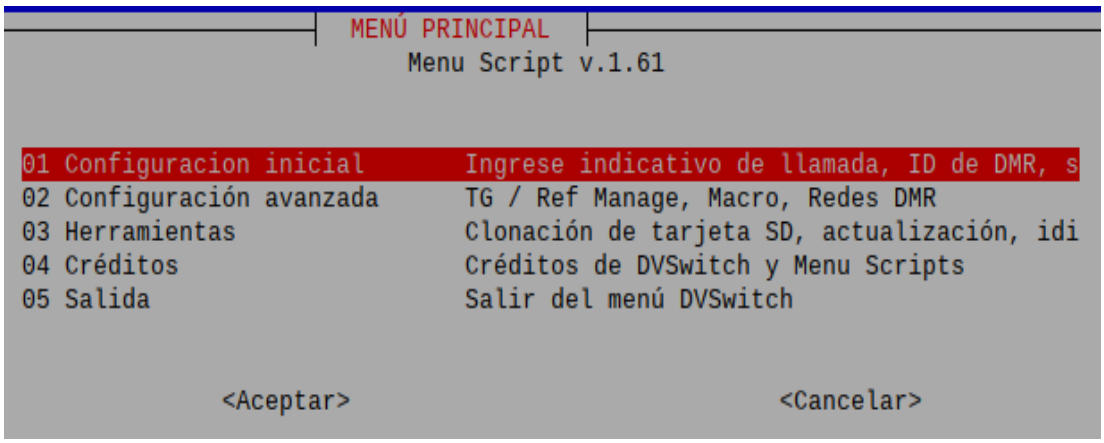
sudo ./búster

Instalamos el dvswitch:

sudo apt-get install dvswitch-server

3.4 Configuración

En el terminal se ejecuta el comando “dvs” para acceder a la ventana de configuración de dvswitch.



Opción del Menú	Descripción
Configuración Inicial	Se utiliza para recopilar información específica requerida para que el servidor se ponga en marcha y funcione en su configuración básica.
Configuración Avanzada	Después de completar la configuración inicial, se puede habilitar las funciones adicionales disponibles a través del Menú de Configuración Avanzada.
Herramientas	Permiten clonar la tarjeta SD del RPi en funcionamiento, editar manualmente los archivos de configuración, actualizar y mejorar el software del servidor, cambiar el idioma del menú, reiniciar los servicios de dvswitch y reiniciar o apagar el servidor.
Créditos	Los personajes principales.
Salir	Salir de los menús de dvswitch y volver al indicador de comandos.

En la configuración inicial se encuentran los parámetros importantes para seleccionarlos.

Dato para Introducir	**Descripción**
Callsign (Obligatorio)	Introducir su Indicativo (“TESTNODE” para pruebas controladas).
ID DMR	Introduzca su ID DMR de 7 dígitos (9999999).
Módulo D-Star (Obligatorio)	El usuario de DVSwitch Mobile debe aceptar el módulo predeterminado "B" (hostpot).
Puerto USRP	Para evitar conflictos con otras aplicaciones, es mejor elegir un puerto entre 50000 y 55000. En la configuración de puente analógico, este mismo número de puerto se introducirá tanto para TxPort como para RxPort.
Vocoder de Hardware (Obligatorio)	Si no tiene un Vocoder AMBE externo, seleccione “No Hardware Vocoder" para simular el vocoder.

Al final de la configuración seleccionar finalizar para que los cambios se guarden automáticamente y salir al menú principal.

4. Listado de equipos y materiales

- Laptop/Computadora
- Internet
- Word
- Dvswitch Server
- Raspberry Pi

5. Conclusiones

- Es posible la instalación de sistemas operativos siempre y cuando sean compatibles con las versiones del hardware utilizado en este caso Raspberry pi 3.

- Para realizar la configuración de Dvswitch server se ingresa el comando dvs en el terminal y se procede con la configuración paso por paso.

6. Recomendaciones

- Se recomienda verificar la versión del sistema operativo y Dvswitch ya que en algunas versiones no se podía instalar lo cual dificultó el proceso de instalación.

- Utilizar memoria de almacenamiento microSD superior a 32 Gb y clase 10 para que el funcionamiento del sistema operativo sea el adecuado.

7. Bibliografía

E. Y. Telecomunicaciones Santiago José Romero Pazmiño, "Implementación de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B usando SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO), hardware y software libre," Nov. 2015, Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11950

Práctica Guiada N°2

1. Tema

Interfaz gráfica Dvswitch (Dashboard)

2. Objetivo

Desarrollar una guía descriptiva del funcionamiento del Dashboard de Dvswitch y análisis acerca de los componentes que conforman la interfaz del dashboard de dvswitch.

3. Procedimiento

3.1 Introducción

El Dashboard es la interfaz web del servidor DVSWITCH que permite comunicarse en modos digitales como DMR, Fusion y D-Star. Se accede a través de un navegador web y sirve para gestionar y monitorizar la configuración y el estado del servidor DVSWITCH. Las configuraciones más comunes incluyen establecer el nombre de usuario, configurar la conexión a redes de radioafición como BrandMeister y verificar el funcionamiento del servidor Figura 37 [44].

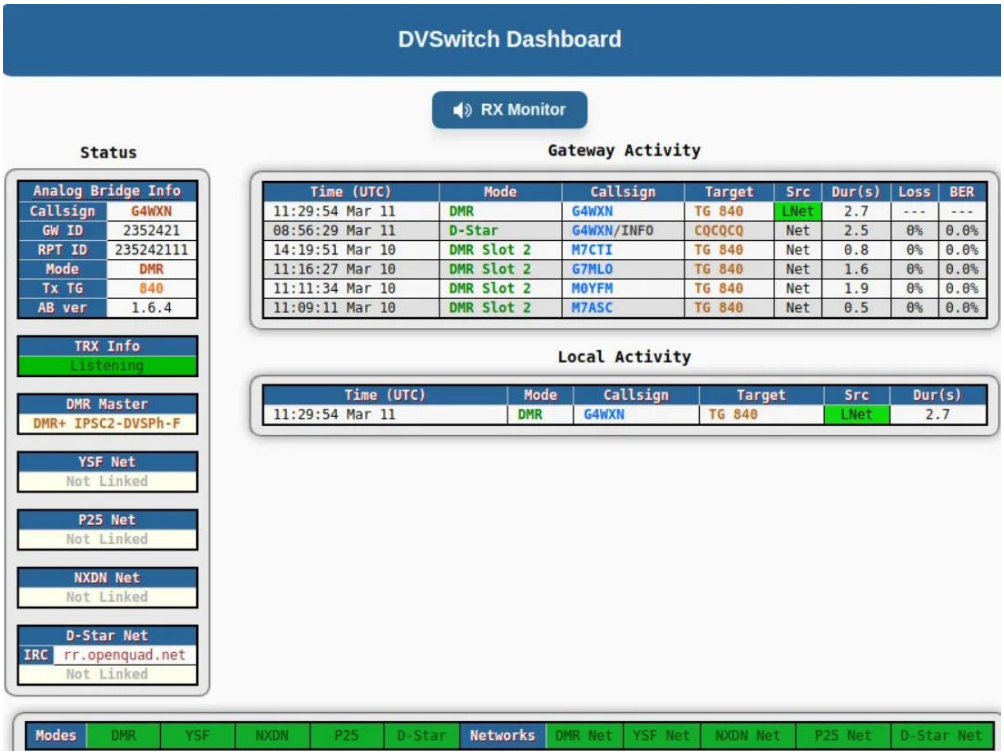


Figura 37. Dashboard Dvswitch-server

DVSwitch cuenta con un panel de control accesible mediante un navegador web. Para acceder a él, necesitas la dirección IP de la Raspberry Pi o el ordenador que estés utilizando, que en la mayoría de las redes domésticas son similares [44].

En la Raspberry Pi o el ordenador donde hayas instalado DVSwitch, abre una ventana de terminal y escribe `ifconfig` para poder observar la dirección ip y luego colocarla en un navegador (<Tu dirección ip>/index.php).

En la Figura 38 se muestra un ejemplo de la dirección ip y la extensión que se debe colocar en el navegador para ingresar a la interfaz de dvswitch.

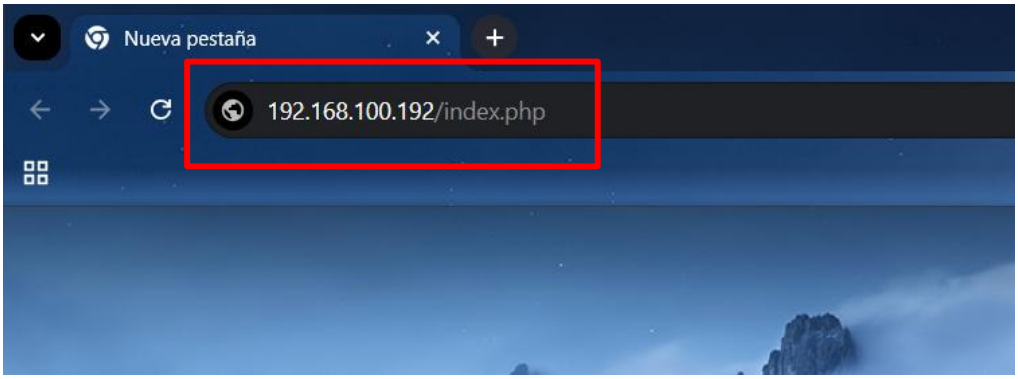


Figura 38. Ejemplo de dirección ip del dashboard

A continuación, se presenta la Figura 39 representativa del dashboard correspondiente a la interfaz de Dvswitch.

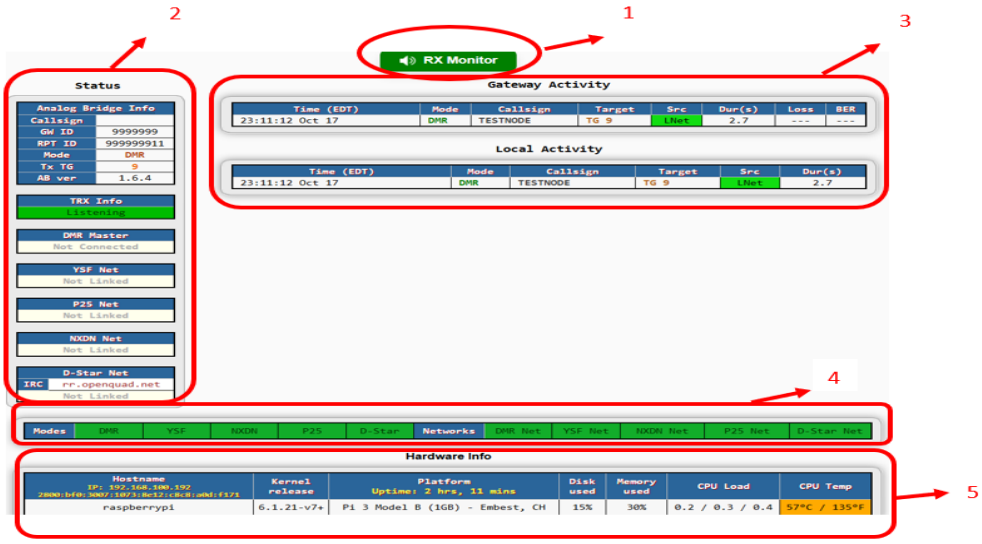


Figura 39. Componentes de la interfaz de Dvswitch

1. RX Monitor

Sección que activa el monitoreo de señales recibidas. Permite escuchar el tráfico digital decodificado en tiempo real.

2. STATUS

- ***Analog Bridge Info***

Información del puente digital que interconecta modos.

Callsing

Indicativo del nodo

GW ID

Identificador único para Tx 7 dígitos

RPT ID

Identificador único + 2 dígitos (

Mode

Modo de enlace

Tx TG

Grupo local de transmisión

AB ver

Versión del Software Analog-Bridge

- ***TRX Info***

Estado de transmisión y recepción (Listening: cuando se encuentra funcionando)

- ***DMR Master***

Conexión a la red DMR Master

- ***YSF Net***

Conexión a la red YSF Net

- ***P25 Net***

Conexión a la red P25 Net

- ***NXDN Net***

Conexión a la red NXDN Net

3. GATEWAY ACTIVITY

Time (EDT)

Hora y fecha de la transmisión y recepción.

Mode

Modo de conexión (DMR)

Callsing

Indicativo del nodo (NODETEST)

Target

Grupo local de transmisión.

Src (Source)

Fuente de transmisión.

Dur(s)

Tiempo de duración en segundos.

Low

Perdida de Paquetes

BER

Tasa de error de bit

4. MODES/NETWORKS

Mode

Es el modo de transmisión de la información. Estas pueden ser:

- DMR
- YSF
- P25
- NXDN
- D-STAR

Network

Es la red a la cual va conectada para realizar el flujo de información.

- DMR Net
- YSF Net
- P25 Net
- NXDN Net
- D-STAR Net

5. HARDWARE INFO

En esta sección se representa el rendimiento y estado del hardware, esenciales para monitorear estabilidad y prevenir sobrecalentamiento. A continuación, se presentan los siguientes puntos:

Hostname

IP publica y nombre de usuario.

Kernel

Versión del Kernel.

Platform

Modelo del Hardware y uptime.

Disk used

Porcentaje de uso del disco.

Memory used

Porcentaje de uso de la memoria.

CPU Load

Carga del procesador.

CPU Temp

Temperatura del procesador.

4. Listado de equipos y materiales

- Laptop/Computadora
- Internet
- Word

5. Conclusiones

- Una vez realizada la instalación de dvswitch se debe ingresar la dirección ip del servidor en un navegador para poder visualizar la interfaz gráfica de dvswitch.
- En el Dashboard se pueden apreciar varios apartados correspondientes a la transmisión de audio, así como el modo de transmisión y también las características del hardware en donde se encuentra el servidor.

6. Recomendaciones

- Colocar la ip correspondiente al servidor en donde se realizó la configuración de dvswitch server para poder ingresar a la interfaz gráfica.
- Investigar los apartados que ofrece la interfaz gráfica de tal modo que se pueda realizar un análisis funcional de la transmisión.

7. Bibliografía

“Panel de control DVSwitch – M7SPI.” Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.m7spi.co.uk/dvswitch-dashboard/

Práctica Guiada N°3

1. Tema

Transmisión básica en Dvswitch

2. Objetivo

Realizar una transmisión digital de sonido utilizando dvswitch server y dvswitch Mobile.

3. Procedimiento

3.1 Introducción

DVSwitch Mobile es una aplicación especializada que permite a los usuarios conectarse desde su dispositivo móvil a un nodo Allstar. La configuración del acceso a DVSwitch Mobile se la realiza en la aplicación en la que se toman en cuenta parámetros de configuración de dvswitch server [45].

3.2 Instalación Dvswitch Mobile

La aplicación dvswitch Mobile se encuentra en PlaySotre de forma gratuita y libre acceso por lo cual facilita su instalación. En la Figura 40 se muestra la aplicación que se debe descargar en el celular.



Figura 40. Aplicación Dvswitch.

3.3 Configuración

Una vez instalado la aplicación se muestra el menú de Dvswitch Mobile en la cual se observan las siguientes secciones:

Dialer

Es la sección principal de la aplicación. Cuenta con números para poder ingresar el TxTG que es el grupo al cual se va a conectar el dispositivo para realizar la transmisión. La Figura 41 muestra la sección correspondiente al Dialer.

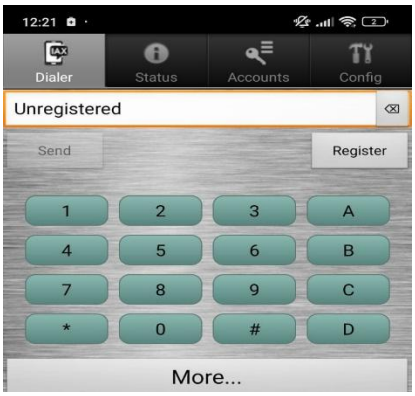


Figura 41. Dialer

Status

Corresponde a la información de dvswitch para verificar el estado en el que se encuentra. Se pueden visualizar parámetros como el registro, el sample rate y los bytes de transmisión y recepción tal como se puede observar en la Figura 42.

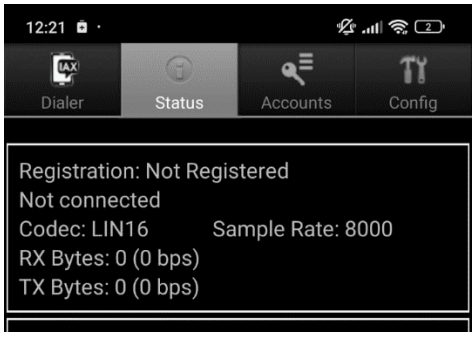


Figura 42. Status

Accounts

En esta sección se realiza la configuración de dvswitch mobile. Se selecciona un espacio vacío (EMPY) como se muestra en la Figura 43 y se procede a configurar con los parámetros establecidos en dvswitch server.

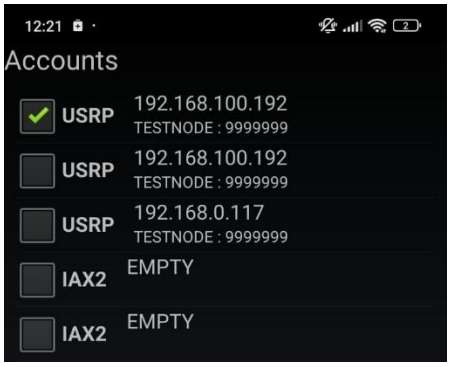


Figura 43. Accounts

Para configurar se deben ingresar los datos que se establecieron al momento que se realizó la configuración en dvswitch server como se muestra a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros de configuración

Parámetro	**Descripción**
Protocol	Protocolo de transmisión
Hostname	Ip del servidor
Port	Puerto que se utiliza para poder transmisitir.
Callsing	Indicativo de Transmisión
DMR ID	Código de identificación

Config

En la sección de config se realiza la configuración de la interfaz de dvswitch mobile. Ademas, algunos parámetros que se utilizan cuando se presiona el botón PTT (Push To Talk) para poder hablar y transmitir como se muestra en la Figura 44.

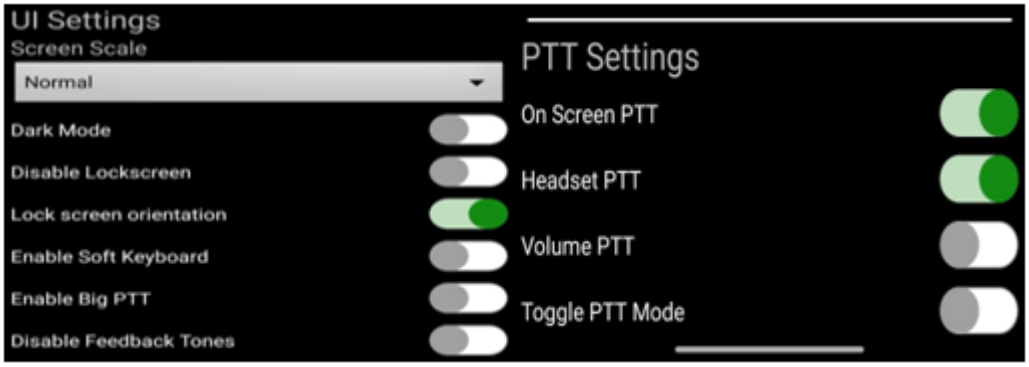


Figura 44. Sección Configuración

4. Listado de equipos y materiales

- Laptop/Computadora
- Internet
- Word
- Dvswitch Server
- Raspberry Pi
- Celular

5. Conclusión

- Al momento de presionar PTT y hablar en el celular, se establece la transmisión de audio y para poder escuchar la recepción se abre la interfaz gráfica, la cual permite escuchar el audio transmitido.

6. Recomendaciones

- Configurar los mismos valores en dvswitch server y dvswitch Mobile, caso contrario no se podrá establecer la comunicación.

7. Bibliografía

“Móvil@DVSwitch.groups.io | wiki.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://dvswitch.groups.io/g/Mobile/wiki/8719

Práctica Guiada N°4

1. Tema

Multiusuario en Dvswitch

2. Objetivo

Configurar dvswitch para que funcione como multiusuario.

3. Marco Teórico

3.1 Introducción

Dvswitch multiusuario es un paquete de expansión en el servidor, lo que permite hasta 40 usuarios adicionales conectados simultáneamente. Cada usuario tiene su propia configuración, como macros y favoritos, y se configuran en el servidor principal asignando un puerto diferente para cada uno [46].

3.2 Instalación

Una vez que se tiene el dvswitch server en funcionamiento se ingresa a un terminal de configuración y se insertan los siguientes comandos:

sudo wget https://github.com/hp3icc/dvsmu/raw/main/setup

sudo chmod +x setup

sudo ./setup

3.3 Configuración

Se ingresa el comando “dvsmu” en el terminal para acceder a la ventana de configuración de dvswitch multiusuario la cual nos permitirá configurar hasta 40 usuarios diferentes. En la Figura 45 se observa la ventana principal para realizar la configuración.

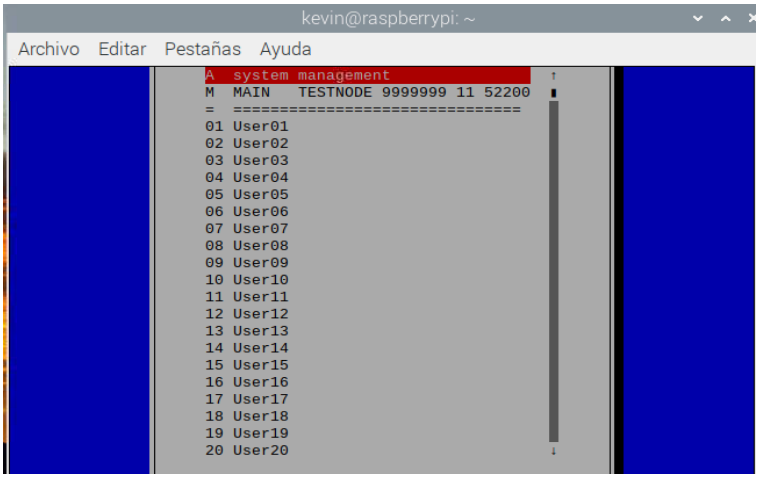


Figura 45.Ventana principal de configuración para multiusuario

Observamos la ventana que se encuentre el servidor que se creó anteriormente y los usuarios que se pueden agregar. Seleccionamos en User 01 y configuramos las ventanas que nos aparecen a continuación. En la Tabla 19 se muestran los parámetros que se deben ingresar para realizar la configuración.

Tabla 19. Parámetros Dvswitch multiusuario

Parámetro	**Descripción**
User	Usuario a configurar
Calling	Indicativo
DMR ID	Código de identificador
Frequency	Freuencia de tx y rx
USRP Port	Puerto del usuario para transmitir

La Figura 46 representa la instalación de dvswitch para multiusuarios en dos dispositivos distintos.

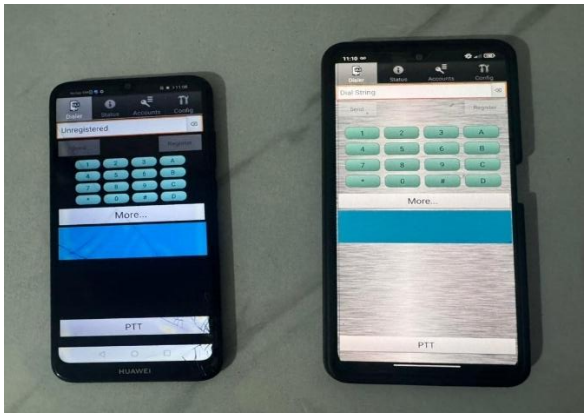


Figura 46. Dvswitch instalado en dos dispositivos.

4. Listado de equipos y materiales

- Laptop/Computadora
- Internet
- Word
- Dvswitch Server
- Celular
- Raspberry Pi

5. Conclusión

- Se configuró multiusuario en dvswitch server en la Raspberry Pi para luego establecer la configuración de Dvswitch Mobile en los 2 dispositivos móviles y establecer la transmisión de audio y poder receptarla en la interfaz gráfica.
- La instalación de multiusuarios puede alcanzar un máximo de 20 usuarios para poder agregarlos.

6. Recomendación

- Es necesario tener más de un dispositivo celular para poder configurar multiusuarios y establecer pruebas de funcionamiento.

7. Bibliografía

"G-hp3icc/DVSMU: DVSwitch MultiUser Mod - DVSMU original code HL5KY /HL5BTF." Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://github.com/hp3icc/DVSMU

Práctica Guiada N°5

1. Tema

GNURadio

2. Objetivo

Desarrollar un sistema de transmisión de audio utilizando GNURadio.

3. Procedimiento

3.1 Introducción a GNURadio

GNU Radio es un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar radios definidas por software. Se puede usar con hardware de RF externo de bajo costo y fácilmente disponible para crear radios definidas por software, o sin hardware en un entorno similar a una simulación. Se usa ampliamente en investigación, industria, academia, gobierno y entornos de aficionados para respaldar tanto la investigación de comunicaciones inalámbricas como los sistemas de radio del mundo real [41].

3.2 Entorno de GNURadio

El lenguaje de programación puede ser en Python o en C++ por lo que esta es una excelente opción cuando ya se conoce como utilizar las librerías ofrecidas por

GNURadio, configurarlas y además se conoce los principios de una programación orientada a objetos, permitiendo tener mayor control por parte del usuario [41].

A continuación, se presenta el entorno de GNURadio Figura 47.

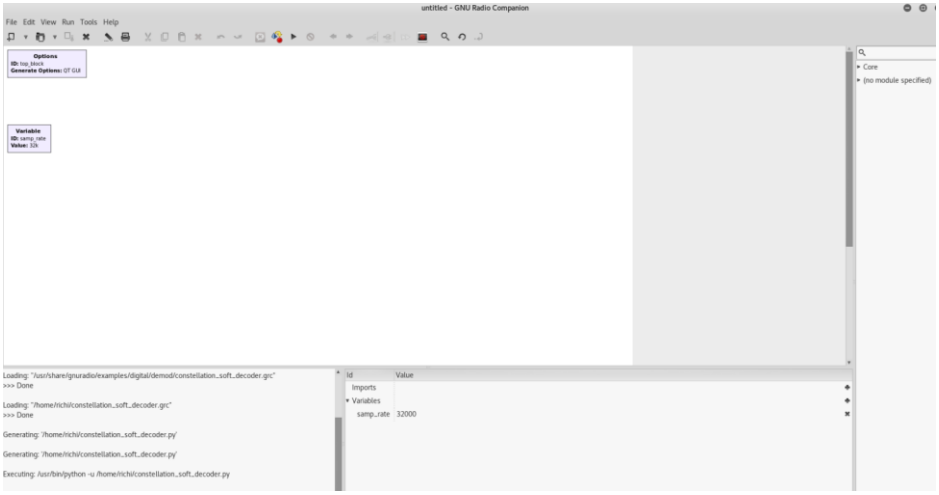


Figura 47. Entorno GNURadio

3.3 Instalación de GNURadio

Para realizar la instalación de GNURadio es necesario tener un sistema operativo Ubuntu para mayor facilidad y abrir un terminal en el cual se insertan los siguientes comandos:

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

sudo apt-get update

sudo apt-get install gnuradio

Siguiendo, se instalan los drivers UHD para vincularnos con USRP.

sudo add-apt-repository ppa:ettusresearch/uhd

sudo apt-get update

sudo apt-get install uhd-host

Una vez instalado todo solo se necesita ingresar el comando “gnuradio-companion” para abrir GNURadio y comenzar a configurar.

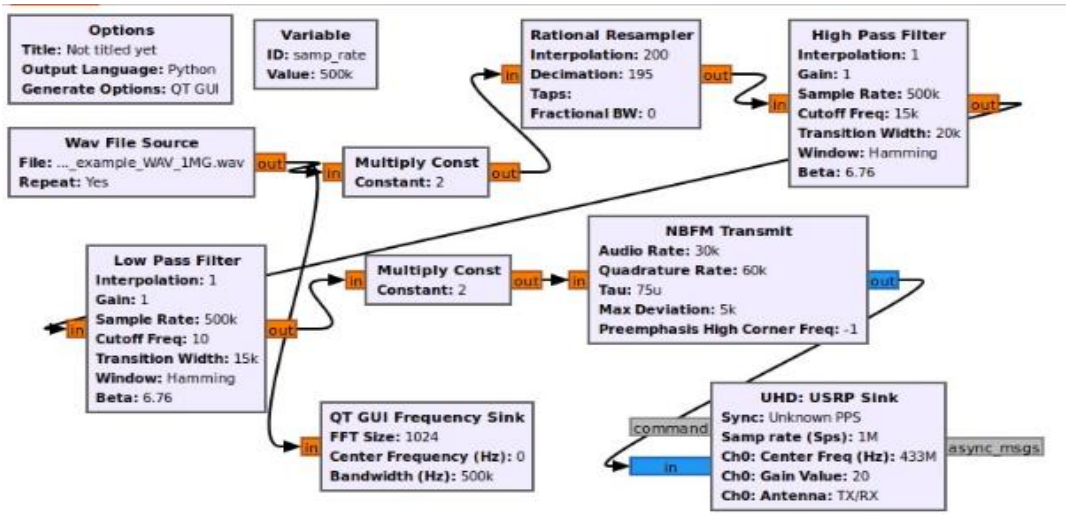


Figura 48. Transmisor de audio con archivo wav.

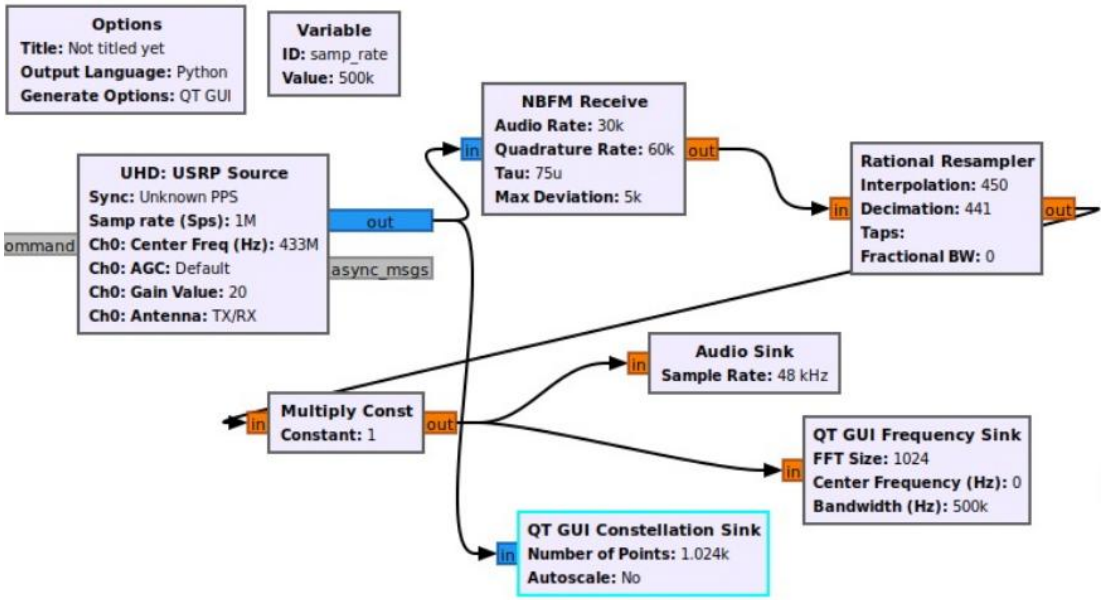


Figura 49. Receptor de audio

4. Listado de equipos y materiales

- Laptop
- Internet
- Word
- Raspberry Pi
- GNURadio

5. Conclusiones

- Para el desarrollo de la práctica se utiliza el bloque principal File Wav en el cual se ingresa un archivo de audio para el envío a través del dispositivo Usrp.

- Para la recepción se utiliza el bloque Audio sink el cual se encarga de recibir el audio y reproducirlo.

- Debido a la existencia de factores como el ruido, atenuación, entre otros, la señal de audio recibida será ineficiente y no tendrá mucha claridad.

6. Recomendaciones

- Añadir los parámetros correspondientes de la transmisión, así como la frecuencia y la tasa de muestreo para establecer una comunicación adecuada.

- Seleccionar los bloques necesarios ya que añadir bloques que no sean los correspondientes, el sistema no funcionará.

7. Bibliografía

R. Por and R. M. Prieto, “Manual de Instalación y uso de GNURadio”, Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://github.com/gnuradio/gr-recipes.git

3.9 Elaboración de manual técnico para replicar el prototipo.

MANUAL TÉCNICO DEL SISTEMA DIGITAL DE TRANSMISIÓN SONORA UTILIZANDO HARDWARE LIBRE

INTRODUCCIÓN

La Raspberry Pi es una microcomputadora de bajo costo y tamaño reducido, diseñada por la Fundación Raspberry Pi con el objetivo principal de fomentar el aprendizaje de la informática y la programación, especialmente entre jóvenes y estudiantes.

Raspberry Pi es una computadora de placa única (Single Board Computer, SBC), capaz de ejecutar un sistema operativo completo y realizar muchas de las funciones de una computadora de escritorio tradicional. A pesar de su tamaño compacto, dispone de múltiples puertos y conexiones, lo que la convierte en una herramienta versátil y potente para una gran variedad de aplicaciones.

DVSwitch es una aplicación cliente-servidor para voz digital de radioaficionados. La aplicación proporciona un componente «servidor» que se ejecuta en una Raspberry Pi (RPi) u otra plataforma Linux. También se puede instalar en un servidor en la nube que ejecute Linux. El componente servidor se distribuye como una imagen RPi con todas las características y funciones instaladas. Por lo tanto, no es necesario descargar ni instalar módulos o programas adicionales para una Raspberry Pi. Hay dos clientes disponibles para DVSwitch.

Hay un cliente Android disponible en la tienda de aplicaciones de Google para prácticamente cualquier tipo de dispositivo Android. Además, el cliente Python USRP (pyUC) está disponible para su uso en Windows, Linux o Mac. Las instrucciones de instalación para el servidor y todos los clientes se proporcionan en este documento.

DVSwitch es compatible con todos los modos de voz digital actuales sin necesidad de hardware adicional, a excepción de D-Star Figura 50.

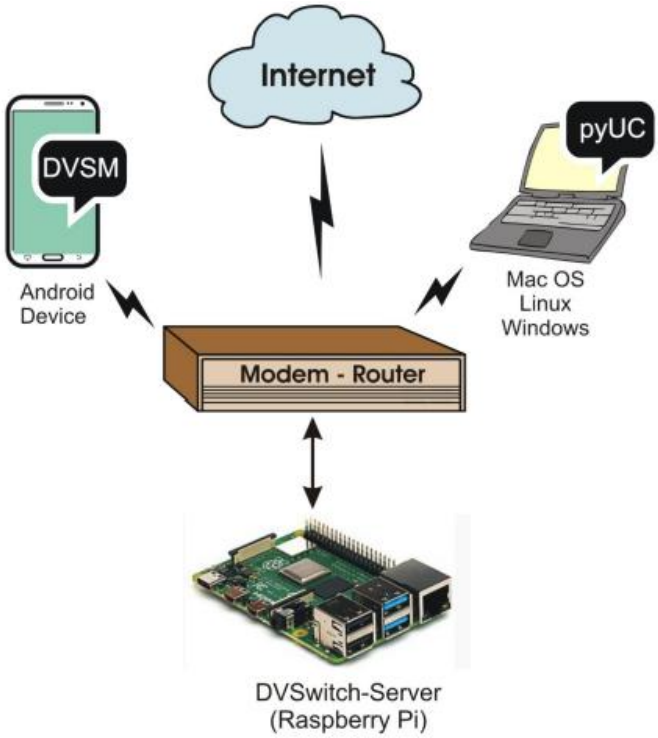


Figura 50. Componentes básicos del Sistema

DESARROLLO

Paso 1: Sistema Operativo para Raspberry pi

Como primer punto es necesario tener la placa Raspberry Pi en la cual se instalará el sistema operativo y se procederá con su respectiva configuración.

Nota: En este caso se utiliza la Raspberry Pi 3 model B y el S.O (Raspberry Pi OS Bullseye).

Link de descarga del S.O:

https://downloads.raspberrypi.com/raspios_oldstable_armhf/images/raspios_oldstable_armhf-2025-05-07/

Paso 2: Instalación del SO en la Raspberry Pi 3



Figura 51. Programa de instalación de imágenes de Sistemas Operativos (BalenaEtcher)

Se debe instalar el SO en una micro SD de preferencia mayor a 8 GB con un programa para cargar imágenes de Sistemas Operativos (Raspberry Pi Imager/BalenaEtcher) Figura 52.

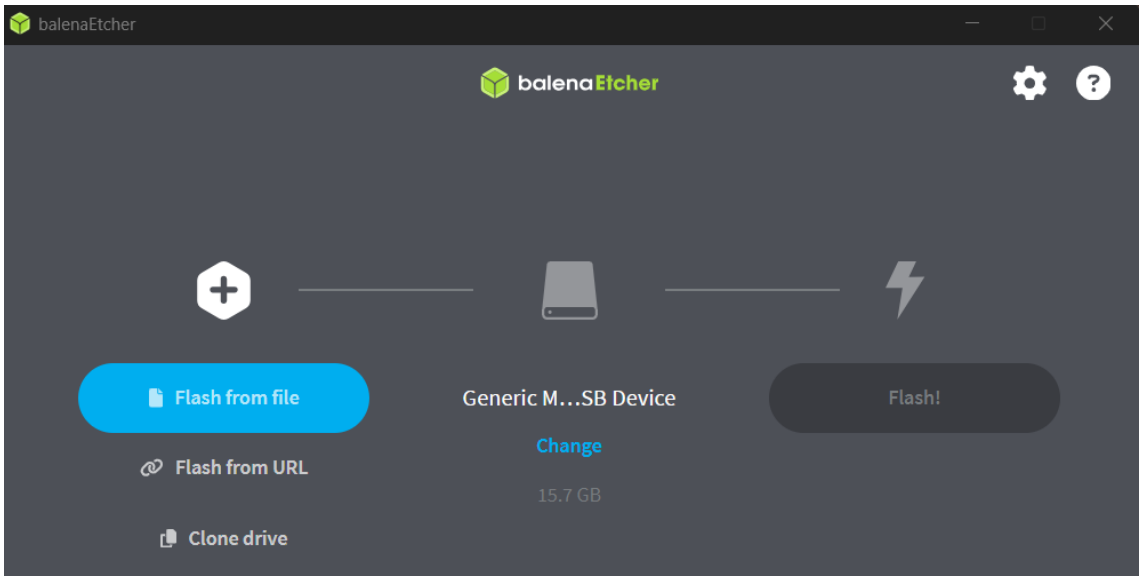


Figura 52. Menú del Programa BalenaEtcher

En Flash from file se selecciona el SO descargado, luego se selecciona el dispositivo de almacenamiento (micro SD) y por último se selecciona la opción Flash Figura 53.

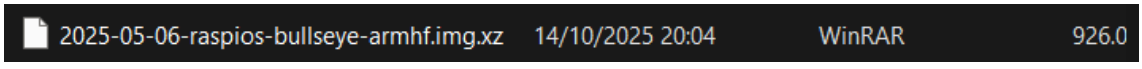


Figura 53. Imagen del SO Raspberry Pi Bullseye

Esperamos que termine la instalación del SO, retiramos la micro SD de la laptop y la colocamos en la Raspberry Pi para realizar la configuración Figura 54.

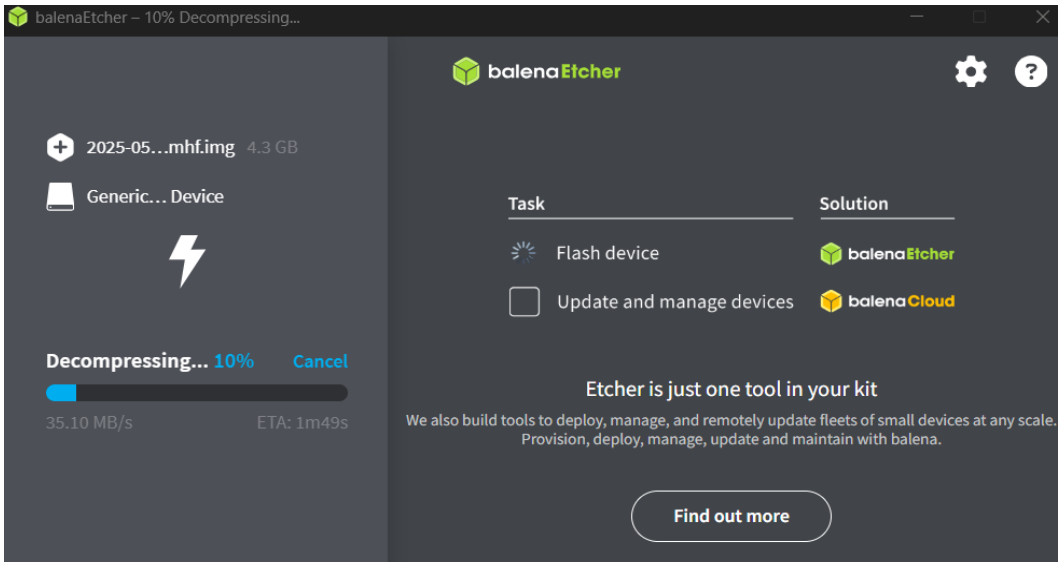


Figura 54. Instalación del SO en la micro SD

Paso 3: Configuración del SO en la Raspberry Pi



Figura 55. Inicio de Instalación

Seleccione su país, el lenguaje y la zona horaria. Presione el botón Next.



Figura 56. Ventana de selección de país

Ingresar el usuario y contraseña para acceder al SO de la Raspberry Pi.



Figura 57. Creación de Usuario y contraseña

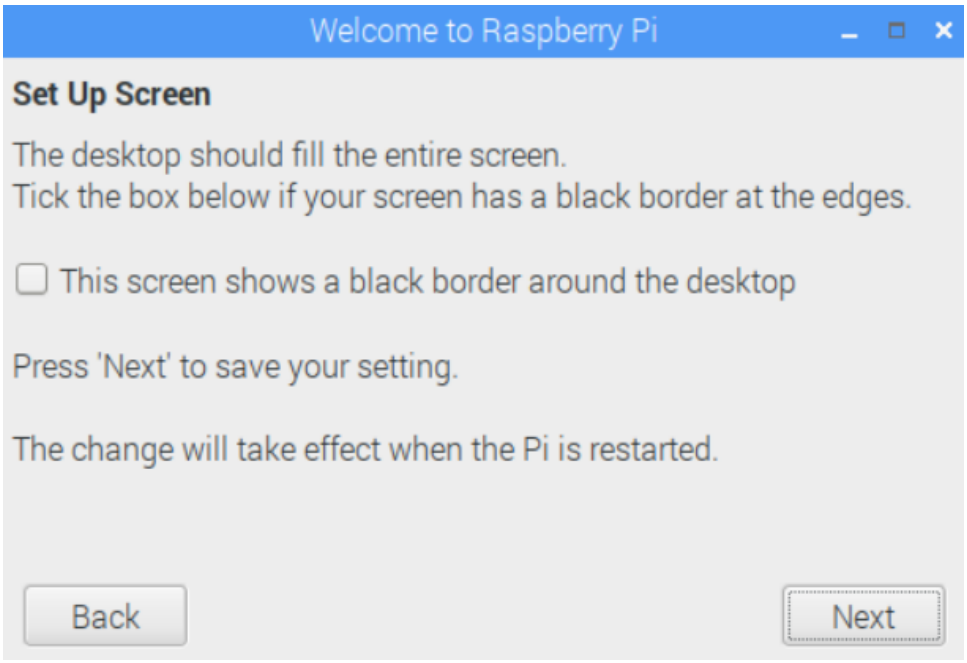


Figura 58. Selección de compatibilidad de tamaño de monitor

A continuación, seleccionamos la red Wifi a la que nos conectaremos para tener acceso a internet. Por último, presionamos en la opción Restart para reiniciar el sistema operativo y se puede aplicar la configuración establecida Figura 59.

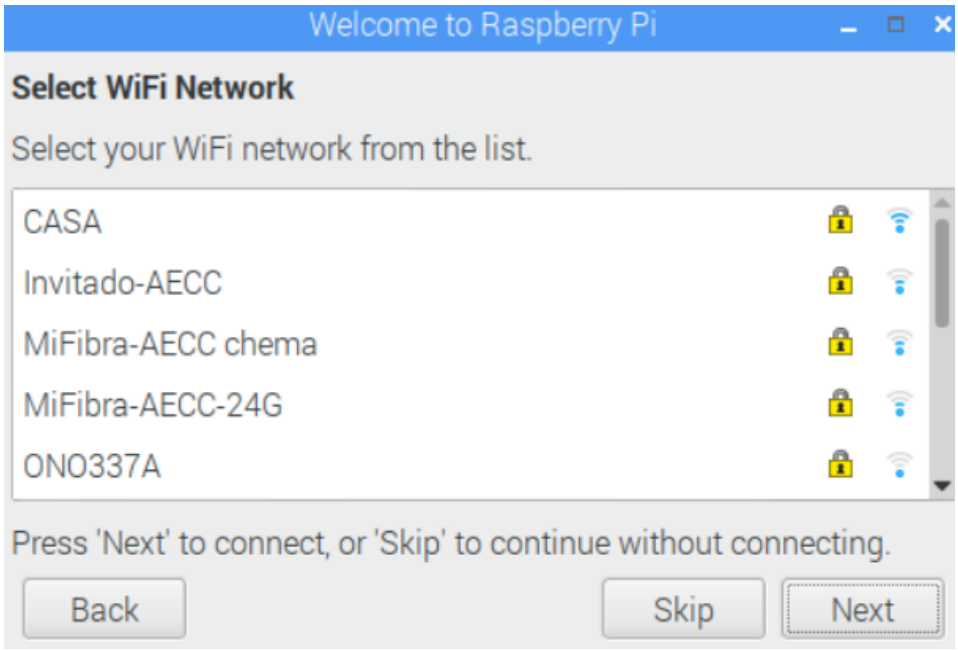


Figura 59. Selección de red Wifi



Figura 60. Reinicio del SO

Paso 4: Instalación de Dvswitch

Abrimos el terminal y escribimos el siguiente comando para actualizar.

sudo apt-get update

```
kevin@raspberrypi:~ $ sudo apt-get update
```

Descargamos el instalador dvswitch

wget http://dvswitch.org/buster

```
kevin@raspberrypi:~ $ wget http://dvswitch.org/buster
```

Concedemos permisos

sudo chmod +x búster

```
kevin@raspberrypi:~ $ sudo chmod +x búster
```

Ejecutamos búster

sudo ./búster

```
kevin@raspberrypi:~ $ sudo ./búster
```

Instalamos el dvswitch

sudo apt-get install dvswitch-server

```
kevin@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install dvswitch-server
```

Reiniciamos

sudo reboot

```
kevin@raspberrypi:~ $ sudo reboot
```

Comando para configurar dvswitch

dvs

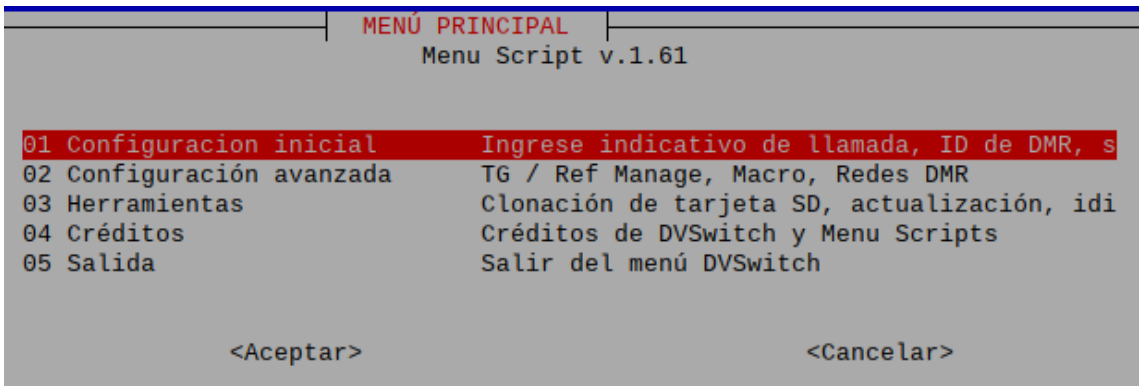


Figura 61. Menú principal dvswitch

Paso 5: Configuración de DVswitch

Para la utilización de Dvswitch, es necesario tener una licencia de radioaficionados que nos proporciona la Arcotel. Sin embargo, si no se puede conseguir la licencia, es posible realizar pruebas controladas de libre acceso teniendo en cuenta que solo se trabajara en una red de área local (LAN).

Abrir el terminal y escribir el siguiente comando

dvs

Se abre el menú principal y seleccionamos la opción 1 Figura 62.

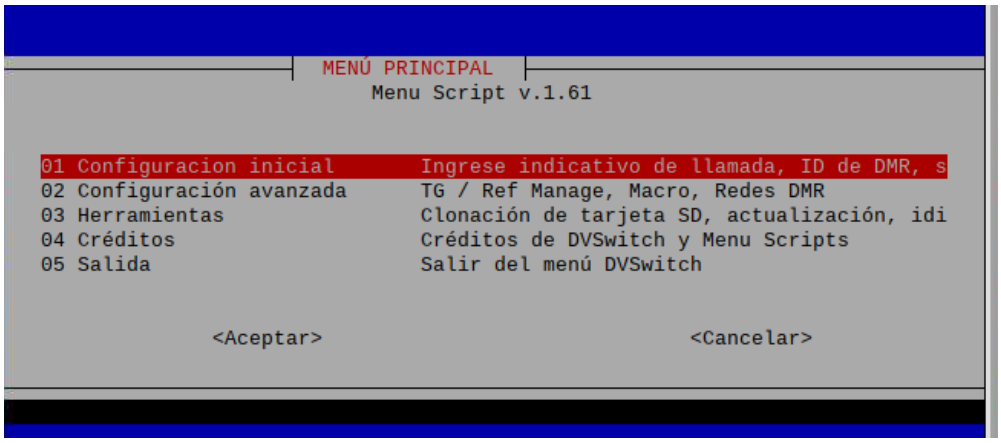
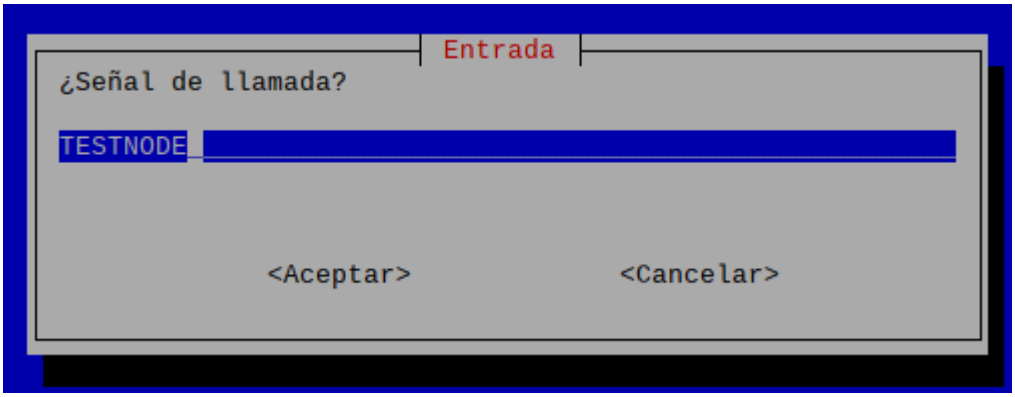


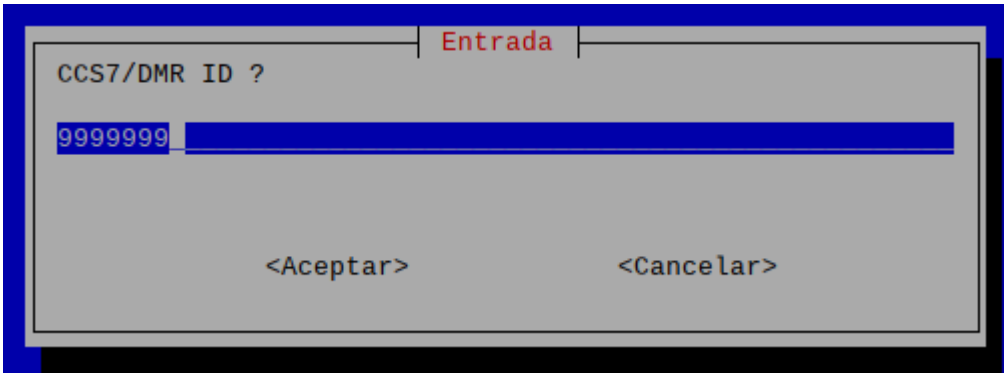
Figura 62. Menú principal

Importante: Dado a que son pruebas de funcionamiento se utilizarán datos de libre acceso.

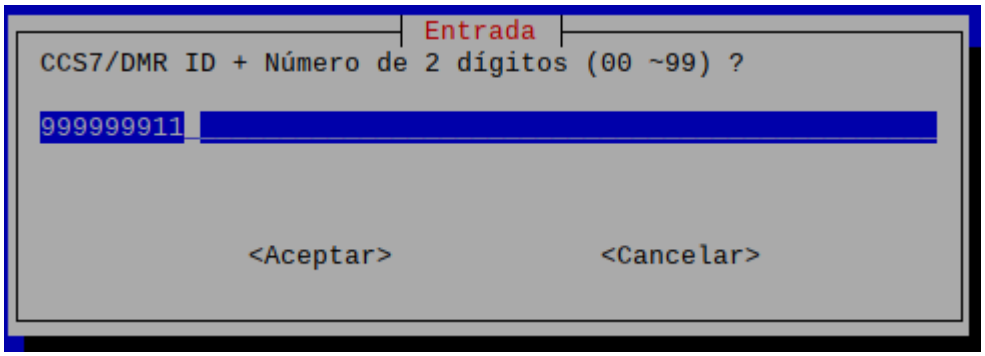
En señal de llamada escribimos el código de licencia de radioaficionados (en este caso escribimos **TESTNODE** para pruebas controladas).



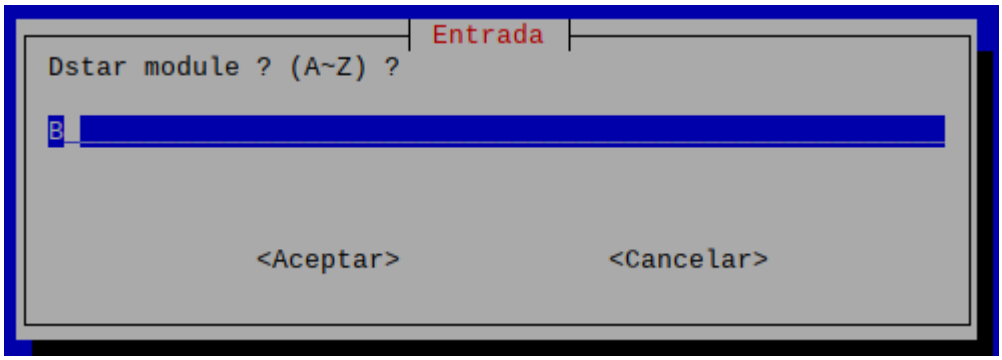
Luego ingresamos el DMR ID



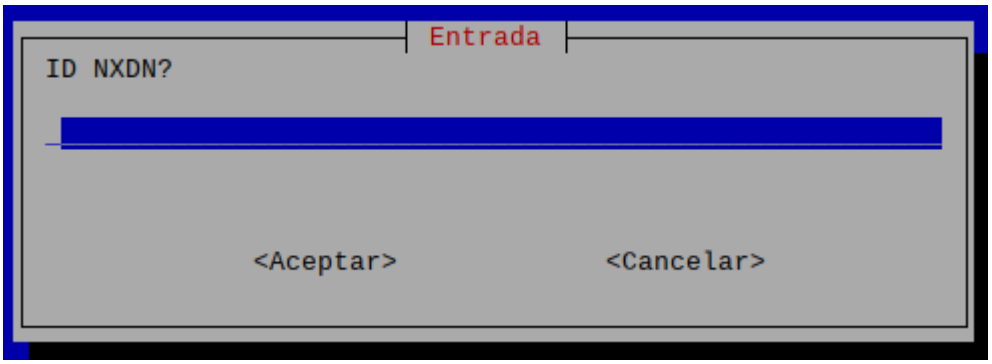
Se ingresa el DMR ID aumentado 2 dígitos por defecto



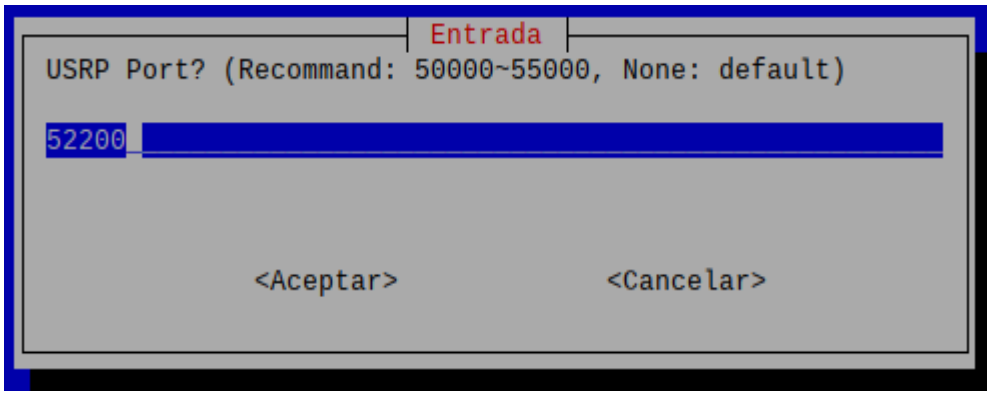
En Dstar module lo dejamos tal como está (B se utiliza para Hostpot)



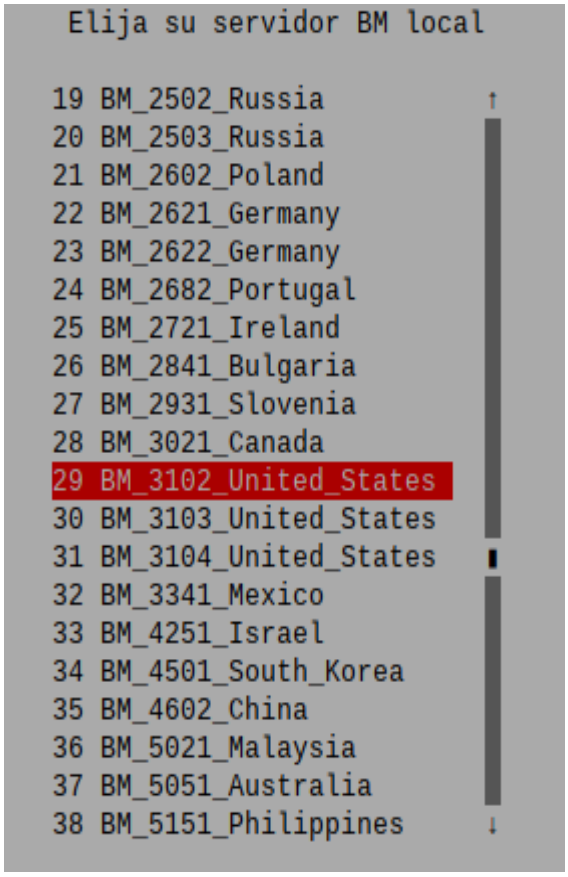
El ID NXDN lo dejamos vacío.



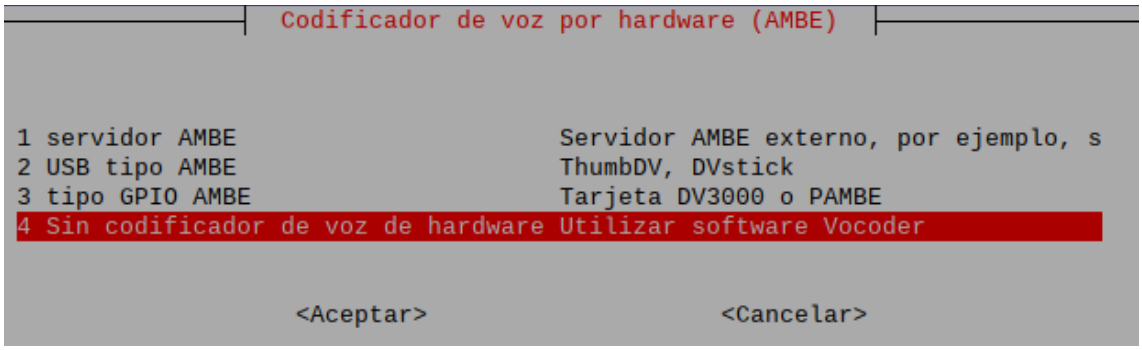
Seleccionamos el rango del USRP Port.



En servidor local seleccionamos el más cercano de nuestro hogar o el que nos ofrezca una mejor señal (United States).



En contraseña lo dejamos en vacío y por último, en codificador de vos seleccionamos la opción 4 (Sin codificador de voz de hardware-Utilizar software vocoder).



Seleccionamos en aceptar para finalizar.

Para verificar que se haya configurado bien se debe ingresar la dirección ip del dispositivo (192.168.100.192/index.php) en un navegador y se tendrá que observar el dashboard del dvswitch server Figura 63.

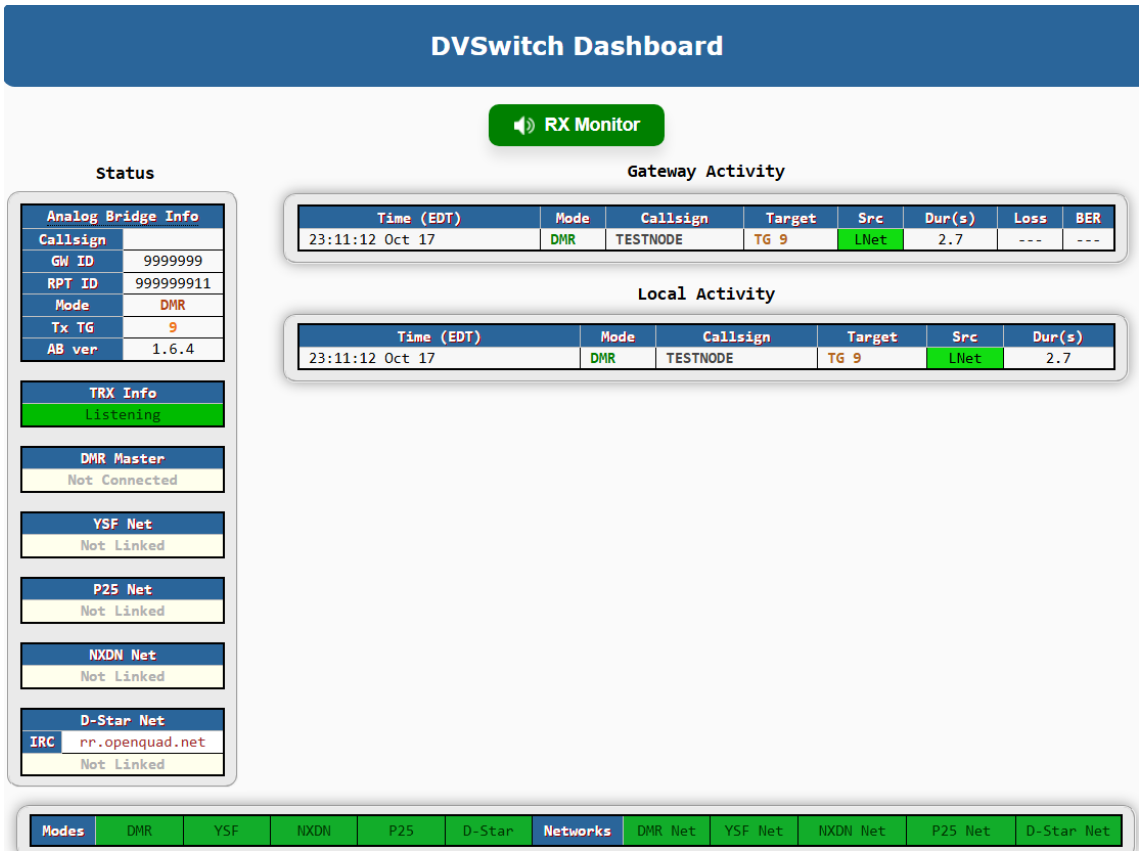


Figura 63. Dashboard de Dvswitch

Paso 6: Instalación y configuración de Dvswitch Mobile en el celular

En la playstore de un celular Android se descarga la aplicación Dvswitch mobile Figura 64.

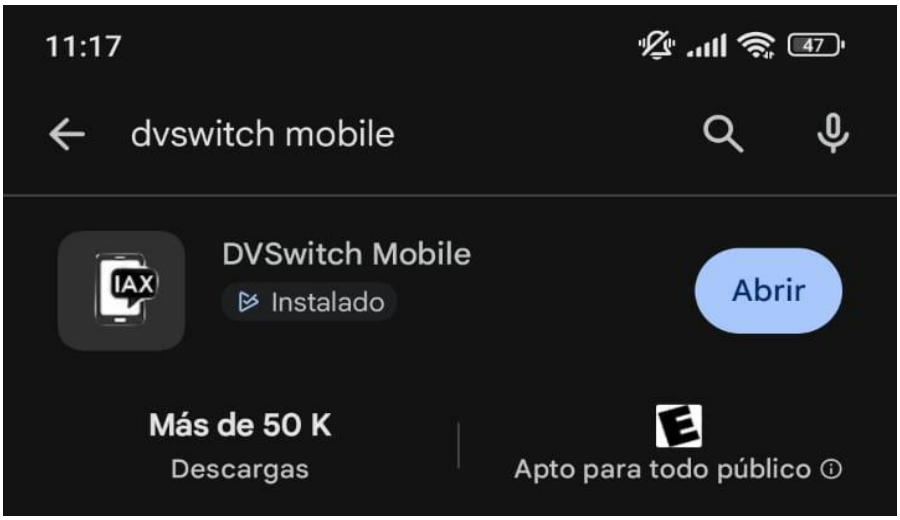


Figura 64. Aplicación Dvswitch Mobile

Abrimos la aplicación, nos dirigimos a la opción de accounts y seleccionamos en empty para realizar la configuración Figura 65.

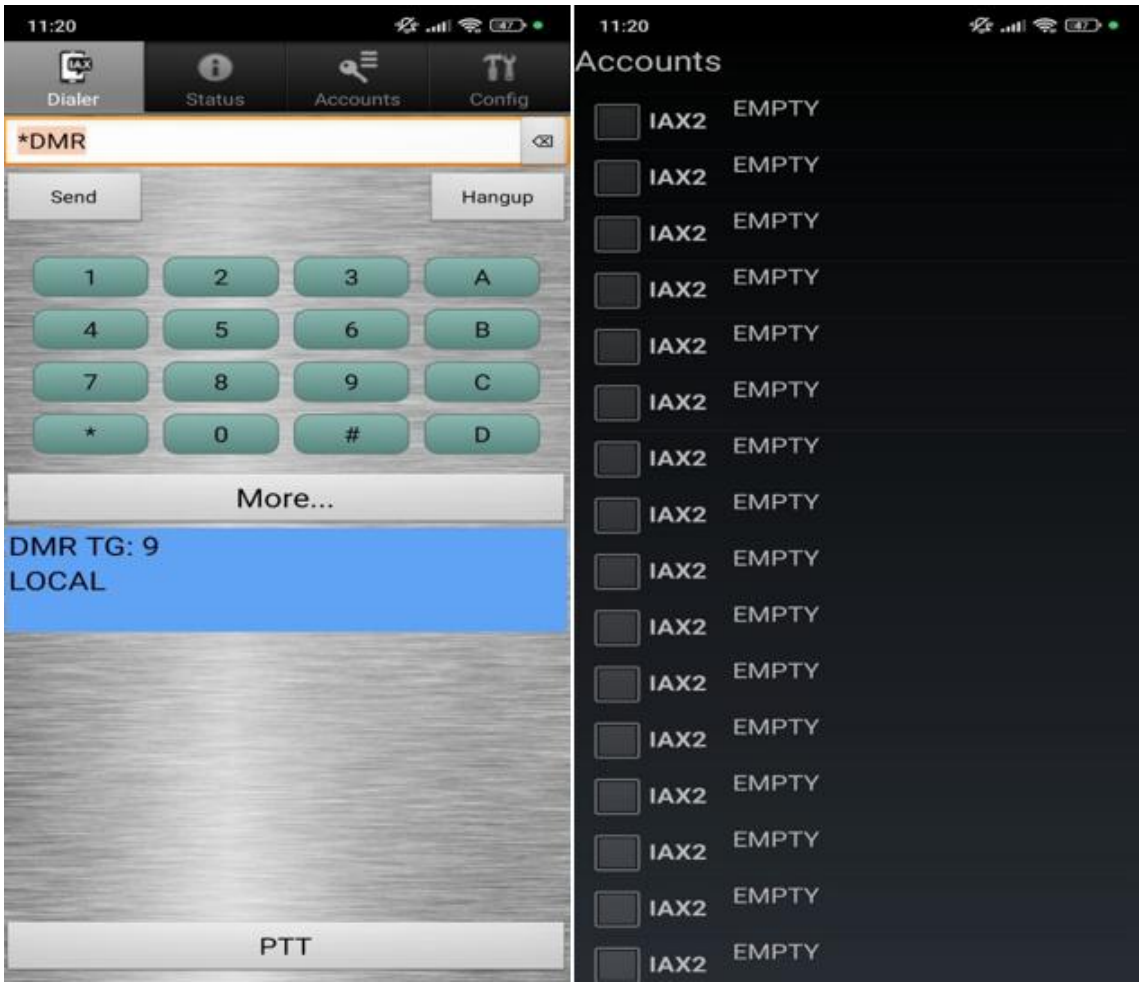


Figura 65. Selección de una cuenta

Llenamos los campos que nos piden con lo siguiente:

Protocolo: USRP

Hostname: 192.168.100.192 (la dirección ip de la raspberry)

Port: 52200

Password: lo dejamos en vacío

Callsing: TESTNODE

DMR ID: 9999999

Presionamos en save.

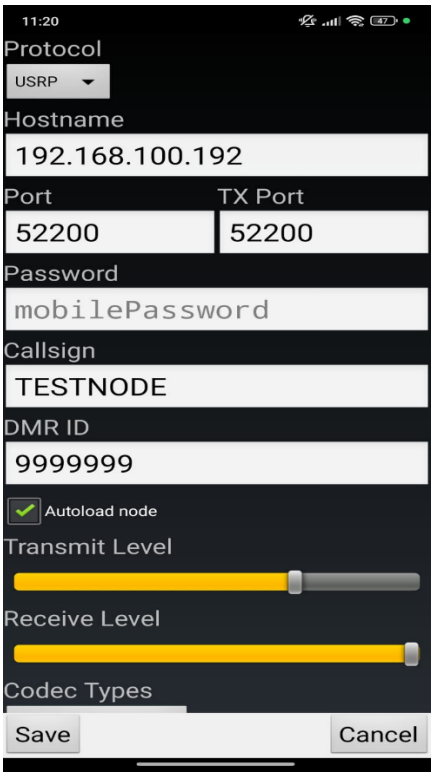


Figura 66. Configuración

En DMR TG escribimos el 9 ya que es el número que se utiliza para realizar pruebas controladas y le damos en send Figura 67.



Figura 67. Selección de TG Group

Comprobamos en la opción de status que se haya realizado el registro y conexión.



Figura 68. Verificación de conexión

Verificamos el funcionamiento presionando PTT (Push To Talk) para hablar y comprobamos en el dashboard del dvswitch presionando en RX Monitor para escuchar Figura 69.

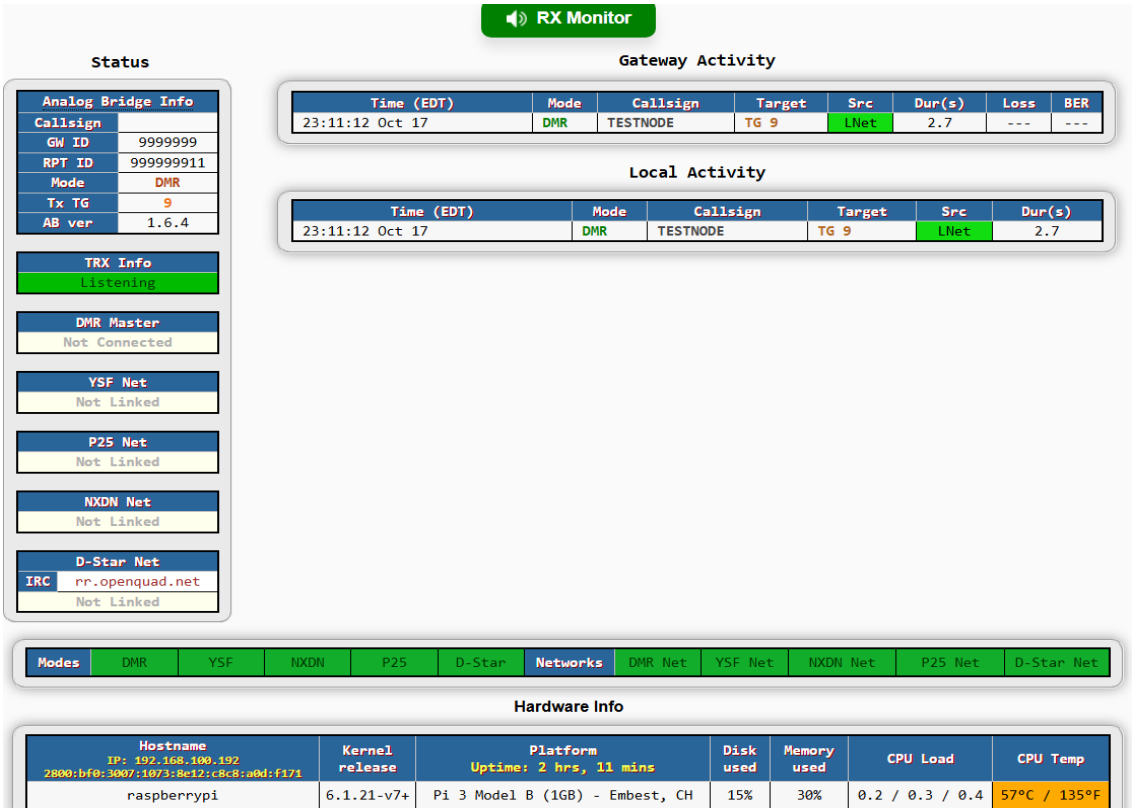


Figura 69. Interfaz del Dashboard en Dvswitch

Paso 7. Instalación del Sistema Operativo UBUNTU Y GNURadio.

Para desarrollar la instalación del sistema operativo Ubuntu se debe tener una máquina virtual (puede ser virtual box o VMware) y proceder con la instalación.

En la Figura 70 se muestra la interfaz de la máquina virtual necesaria para la instalación de Ubuntu.

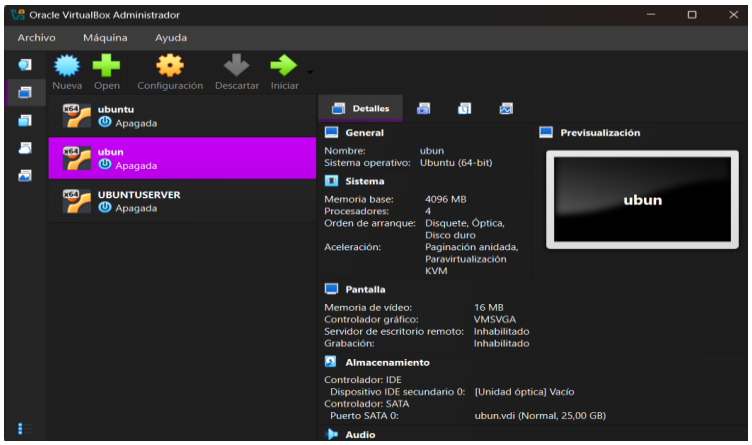


Figura 70. Interfaz de Virtual Box.

A continuación, es necesario descargar la imagen del S.O para poder cargarla en la máquina virtual. El link de descarga de la imagen de Ubuntu es de la página oficial:

Download Ubuntu Desktop | Ubuntu

Una vez cargada la imagen y configurado el sistema operativo se mostrará una ventana como se visualiza en la Figura 71.

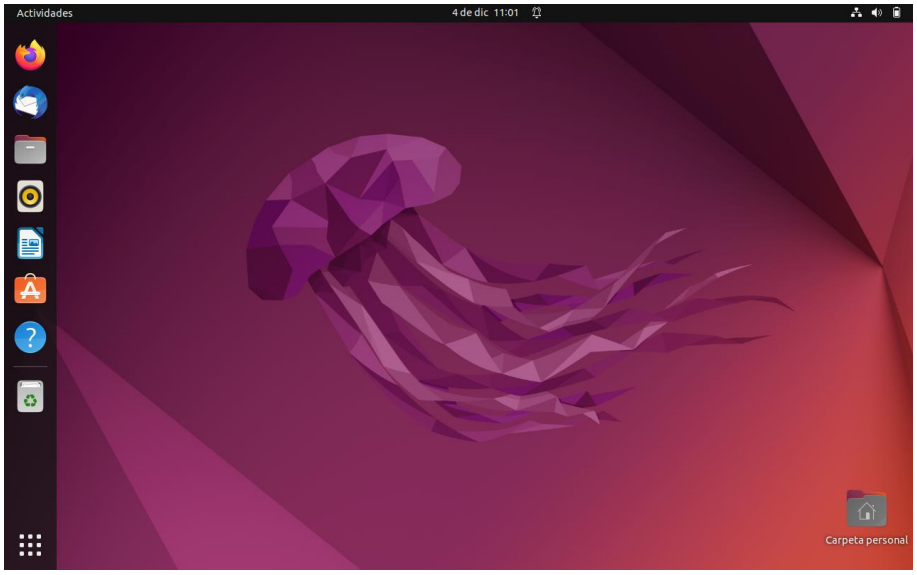


Figura 71. Interfaz de UBUNTU

- **Instalación de GNURadio**

En la interfaz se abre un terminal para agregar el comando que permitirá añadir el repositorio del sistema operativo.

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

Se ingresa el comando para realizar actualizaciones.

sudo apt-get update

Por último, se ingresa el comando para realizar la instalación de GNURadio.

sudo apt-get install gnuradio

- **Instalación de drivers UHD**

Para poder establecer comunicación con el dispositivo USRP es necesario la instalación de drivers necesarios para que el entorno de GNURadio pueda reconocer al hardware.

sudo add-apt-repository ppa:ettusresearch/uhd

sudo apt-get update

sudo apt-get install uhd-host

- **Conexión Física y de red**

La conexión de la Raspberry/Laptop con el USRP es mediante cable Ethernet tomando en cuenta sus direcciones IP. La Figura 72 indica el diagrama de conexión de GNURadio con el USRP.

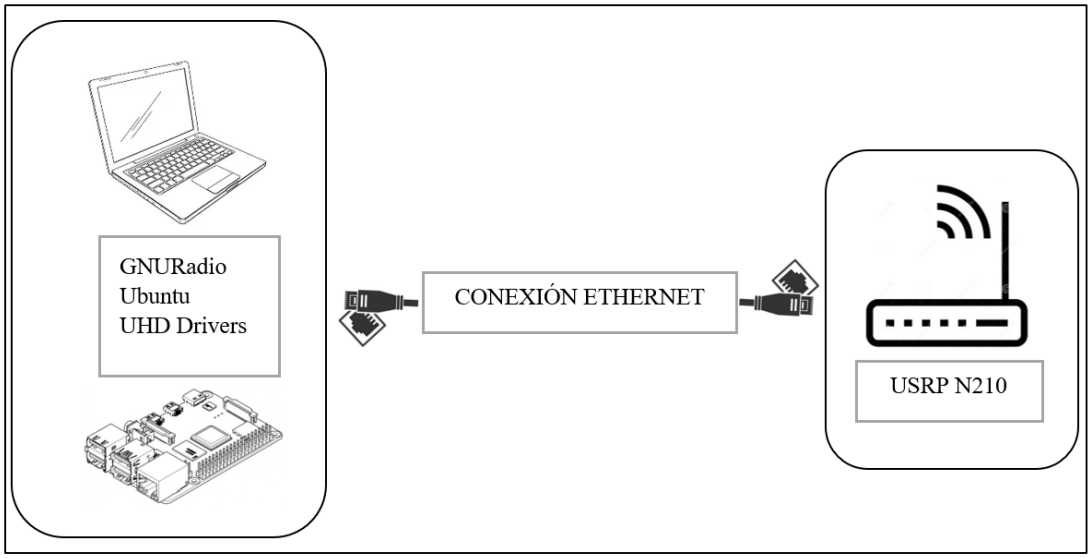


Figura 72. Diagrama de conexión con el USRP

En primer lugar, se debe tener en claro la dirección IP del USRP, por lo general la dirección por defecto es 192.168.10.2. Sin embargo, es posible escanear la dirección IP del dispositivo con un programa para escanear direcciones IP.

Luego, se configura IP de la Raspberry o de la laptop de manera estática en donde se encuentre GNURadio con una dirección IP dentro del rango del USRP (en este caso 192.168.10.1). La Figura 73 muestra la configuración de la IP de forma estática.



Figura 73. Configuración de IP en UBUNTU

Para verificar que exista conexión entre GNURadio y el USRP se ingresa el siguiente comando:

uhd_find_ devices

La Figura 74 muestra la conexión exitosa entre el dispositivo USRP con el entorno de GNURadio.

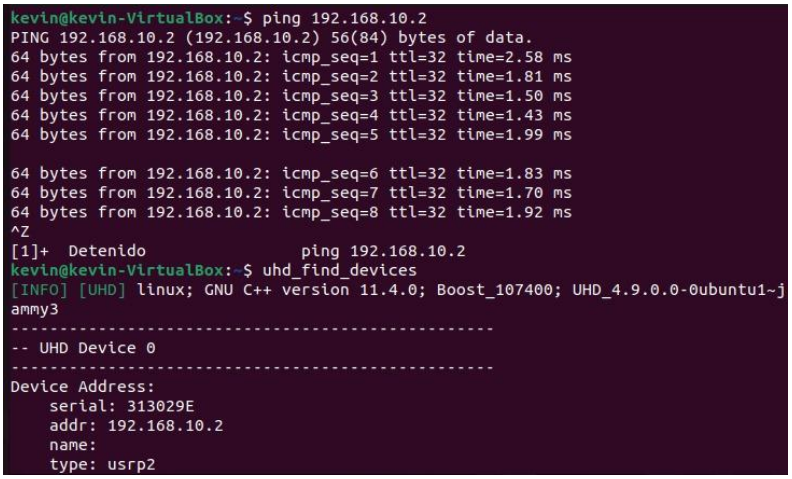


Figura 74. Conexión del USRP

Paso 8. Diseño de diagramas de bloques de transmisión y recepción en GNURadio.

Se generan los bloques requeridos para realizar la transmisión y recepción de audio utilizando los USRP.

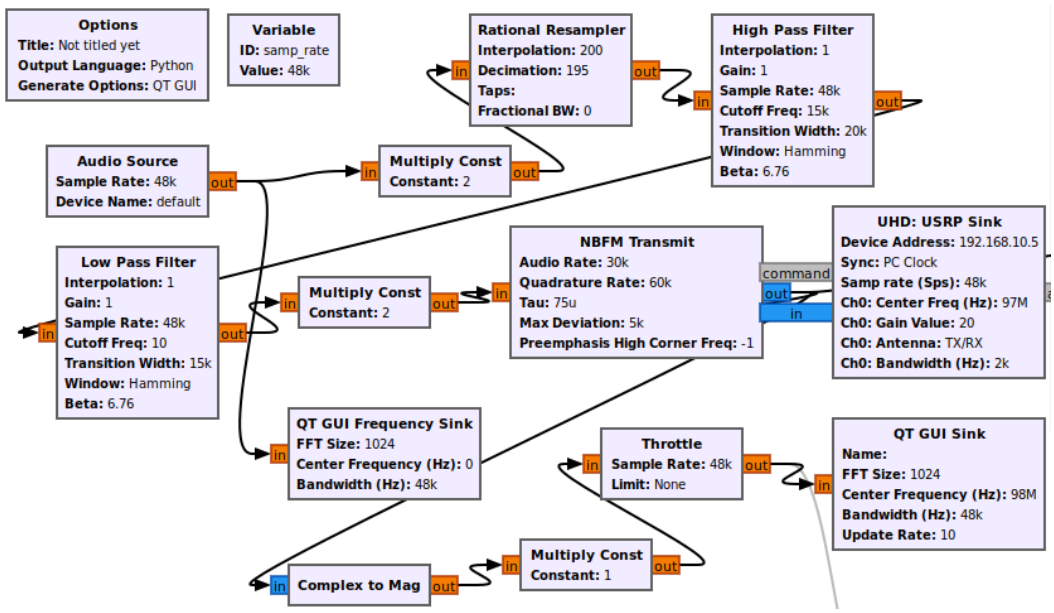


Figura 75. Transmisor de audio FM.

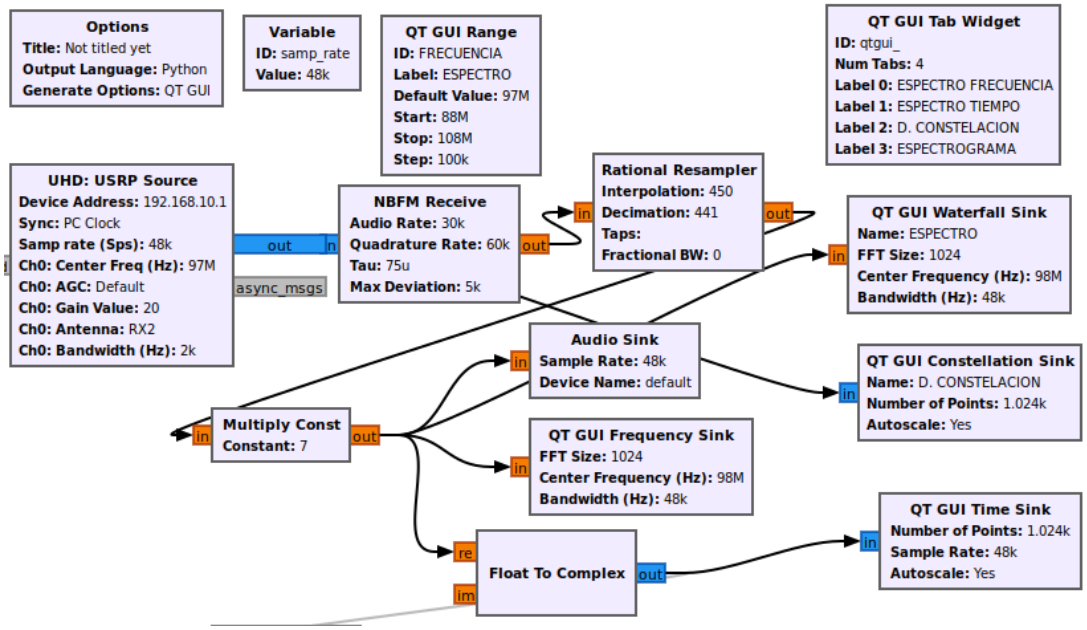


Figura 76. Receptor de audio FM.

En la Tabla 20 se indican los parámetros utilizados para la transmisión y recepción de audio FM.

Tabla 20. Parámetros de TX y RX

Parámetro	**Especificación**
Frecuencia de Tx y Rx	97 MHz
Samp Rate	47 kHz
Ganancia de la antena	20 dB
Modo de la antena	TX/RX

3.10 Preparación de material demostrativo para ferias académicas y jornadas de divulgación.

En la Figura 77 se observa la implementación física del prototipo en la cual se utiliza un micrófono conectado a la Raspberry pi a través de cable USB para captura la señal de audio. A continuación, se conecta la raspberry a un dispositivo USRP que se encuentra instalado GNU Radio para que funcione como transmisor. La segunda USRP se encuentra conectada a la laptop del mismo modo con conexión mediante ethernet para que funcione como receptor de la señal FM. La Figura 79 muestra la conexión física del celular con la app Dvswitch Mobile con la Raspberry y se visualiza el entorno gráfico con un monitor.

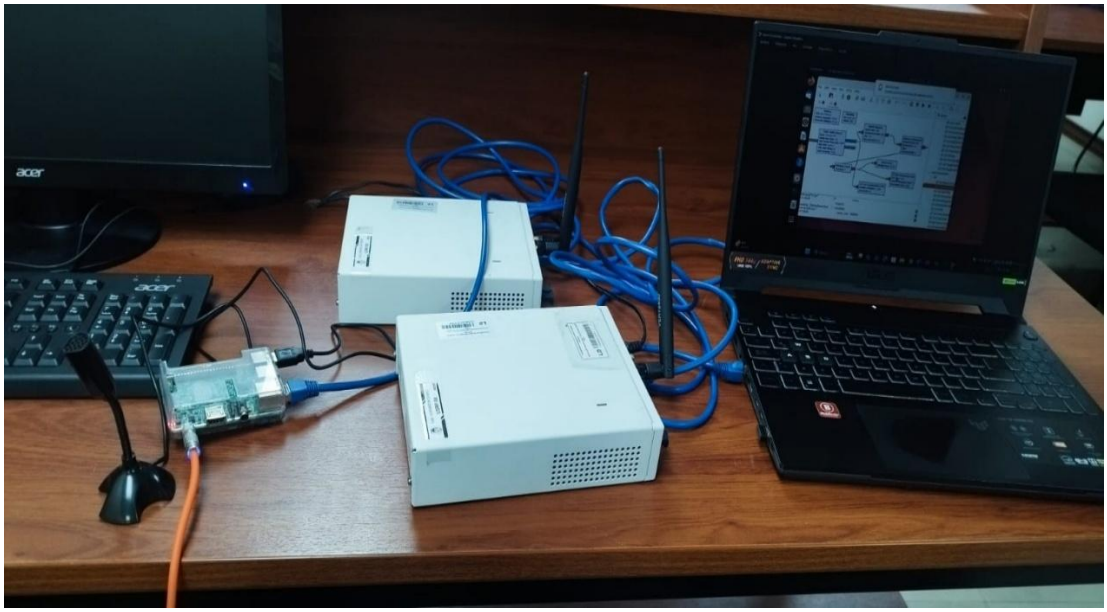


Figura 77. Conexión Física del sistema de Transmisión FM.



Figura 78. Pruebas de funcionamiento del Sistema conectados físicamente.

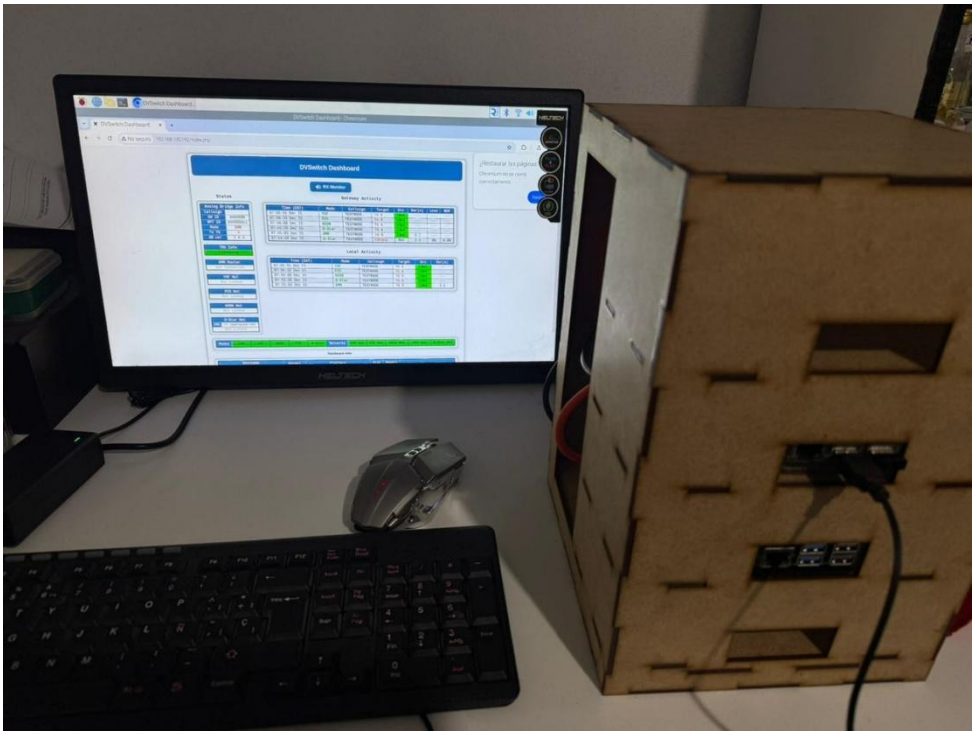


Figura 79. Visualización de la conexión del sistema Digital con Dvswitch Mobile y Raspberry Pi.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Al momento de realizar las pruebas de funcionamiento de la transmisión digital con Dvswitch se obtuvieron niveles de latencia inferiores a 120 ms, cumpliendo de este modo con el estándar ITU-T G.114 el cual establece latencias inferiores a 150 ms para una comunicación estable y aceptable.

- El porcentaje del BER medido en las pruebas de transmisión digital fueron bajas no superando el 4%, lo que da a entender que la comunicación es estable y ofrece calidad de señal de audio.

- En las pruebas de transmisión FM utilizando GNU Radio y USRP, el análisis del SNR obtuvo valores menores a 13dB a diferentes distancias y el nivel de latencia obtenida no supero los 150 ms encontrándose en un rango aceptable. Si embargo, el audio transmitido presentaba mucho ruido y atenuación debido a la capacidad de procesamiento de la Raspberry al no poder procesar de una manera eficaz el sistema transmisor de audio FM.

- La implementación de un sistema digital demostró ser una alternativa viable, accesible y replicable frente a los altos costos de equipos comerciales y software de carácter privado.

- Luego de establecer la transmisión digital realizada en Dvswitch frente a la transmisión FM desarrollada en FM, se llegó a la conclusión que la transmisión en Dvswitch es la más factible y eficaz debido a que el envío de audio es más eficaz por su calidad de recepción y la existencia de una latencia poco notable a diferencia de la transmisión en GNU Radio en donde existió mucha latencia y presencia de ruido notorio.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda hacer manuales de instalación detallando los pasos que se están realizando ya que es posible que exista un fallo y se borre toda la información y programación desarrollada hasta el momento.

- Como el proyecto es de carácter escalable se recomienda replicarlo para áreas más extensas y no limitarse a entornos controlados.

- Integrar otros dispositivos de libre acceso (como por ejemplo Hack RF) para verificar su funcionamiento y eficacia al momento de realizar transmisiones y poder establecer comparativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] N. I. B. Association, “Wearable Technology in Healthcare: Current Trends and Future Possibili ties,” 2025, doi: 10.59646/mrnc11/321.

[2] M. Solutions, “Digital vs Analógico,» MotorolaSolutions.com”.

[3] I. J. Coronel González *et al.*, “Dirigido por: Dirigido por”.

[4] J. Ronquillo, “Sistema de monitoreo y control de los parámetros operativos de los tra nsmisores de radiodifusión fm aplicando una estructura iot y redes sdn,” 2022.

[5] D. E. Implementación De Un Banco De Pruebas De, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA”.

[6] J. Tatiana, C. Sari, I. J. Gabriel, and O. Aldeán, “Universidad Nacional de Loja Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables”.

[7] A. F. Z. C. Y. F. S. C. Garzón, “Desarrollo de un sistema de transmisión de radiodifusión sonora FM dig ital usando un dispositivo USRP 2944RIO,» Trabajo de titulación,” 2024.

[8] J. Palán, “Jonathan David. Guías de prácticas de laboratorio interdisciplinarias para sistemas de comunicaciones utilizando radio definido por software,” 2024.

[9] J. Mitola, “The software radio architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 26–38, 1995, doi: 10.1109/35.393001.

[10] J. M. R. M. P. Weathers, “Low-cost Digital FM Radio Broadcasting Using Open-source SDR Platforms,” pp. 653–660, 2021.

[11] K. M. A. N. A. M. Dillinger, “Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions,” 2003.

[12] E. Blossom, “GNU radio: tools for exploring the radio frequency spectrum,” *Linux journal*, vol. 2004, no. 122, 2004.

[13] M. Lichtman, “A Communications Perspective on the USRP and GNU Radio,” pp. 34–40, 2018.

[14] T. Ulversoy, “Software Defined Radio: Challenges and Opportunities,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 531–550, 2010, doi: 10.1109/surv.2010.032910.00019.

[15] D. Pinar, “SOFTWARE DEFINED RADIO: USRP Y PLATAFORMAS DE DESARROLLO”.

[16] Ni, "¿Qué es la radio definida por software USRP?,» National Instruments (N I)".

[17] R. J. Rico and S. L. Salas, "SDR y GNU Radio como plataforma para un laboratorio de comunicaciones digitales," *RECIBE REVISTA ELECTRÓNICA DE COMPUTACIÓN INFORMÁTICA BIOMÉDICA Y ELEC TRÓNICA*, vol. 8, no. 2, pp. C3-13, 2019, doi: 10.32870/recibe.v8i2.136.

[18] F. R. Pi, "Raspberry Pi Hardware," pp. 1–21, 2016, doi: 10.1002/9781119211051.ch1.

[19] "Software SDR - GNU Radio - Ettus Research | Ettus Research, una marca de National Instruments | El líder en radio definida por software (SDR)." Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.ettus.com/sdr-software/gnu-radio/

[20] "¿Qué es NI LabVIEW? Programación gráfica para pruebas y medidas - NI." Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.ni.com/es/shop/labview.html?srsltid=AfmBOopQifZdS139ZzrL3e6m0xY82LAZNmqzO5Hg7r7PesHm98YyA4vN

[21] "MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico." Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/products/matlab.html

[22] A. O. A. R. Schafer, "Discrete-Time Signal Processing," *Electronics and Power*, vol. 23, no. 2, pp. 157–157, 1977, doi: 10.1049/ep.1977.0078.

[23] D. S. G. S. H. Taub, "Noise in digital communication systems," *Cambridge University Press eBooks*, pp. 363–398, 2017, doi: 10.1017/9781316257364.009.

[24] J. Proakis, "Direct-conversion radio transceivers for digital communications," *IEEE J Solid-State Circuits*, vol. 30, no. 12, pp. 1399–1410, 1995, doi: 10.1109/4.482187.

[25] B. Razavi, "CMOS technology characterization for analog and RF design," 2002, doi: 10.1109/cicc.1998.694900.

[26] R. Schreier and G. C. Temes, "Understanding Delta-Sigma Data Converters," *IEEE eBooks*, 2004, doi: 10.1109/9780470546772.

[27] S. Haykin, "Cognition is the Key to the Next Generation of Radar Systems," pp. 463–467, 2009, doi: 10.1109/dsp.2009.4785968.

[28] S. Haykin, "Maximum-Likelihood Estimation," 2003, doi: 10.1002/0471219282.eot174.

[29] R. Gurrola, "Design and implementation of a digital FM transmitter using SDR," vol. 16, no. 3, 2018.

[30] A. Spanias, T. Painter, and V. Atti, "Audio Signal Processing and Coding," 2005, doi: 10.1002/0470041978.

[31] “ZONA DMR CL.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://zonadmr.cl/guia-para-la-instalacion-de-dvswitch/

[32] “Algoritmos DVSI.” Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.dvsinc.com/soft_products/software.shtml

[33] “DVSwitch Installation and User Guide”.

[34] “main@DVSwitch.groups.io | Inicio.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://dvswitch.groups.io/g/main?

[35] “Móvil@DVSwitch.groups.io | wiki.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://dvswitch.groups.io/g/Mobile/wiki/8719

[36] “¿Qué es DMR? - Motorola Solutions LATAM.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.motorolasolutions.com/es_xl/solutions/what-is-dmr.html

[37] “Introducción al sistema D-STAR | Explore nuestras soluciones | Icom Inc.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.icomjapan.com/explore/d-star/

[38] “¿QUÉ ES LA FUSIÓN DE SISTEMAS? | SystemFusion.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://systemfusion.yaesu.com/what-is-system-fusion/

[39] I. Terminada Yeins Rosio Garcia Bautista, Y. Rodriguez Cotte, R. Andres Diaz Suarez, and U. Santo Tomas, “Desarrollo de un sistema receptor FM usando el SDR HacK RF”.

[40] E. Y. Telecomunicaciones Santiago José Romero Pazmiño, “Implementación de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B usando SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO), hardware y software libre,” Nov. 2015, Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11950

[41] R. Por and R. M. Prieto, “Manual de Instalación y uso de GNURadio”, Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://github.com/gnuradio/gr-recipes.git

[42] “ITU-T Recommendation G.114: Transmission Systems and Media : General ... - Telecommunication Standardization Sector of ITU. - Google Libros.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books/about/ITU_T_Recommendation_G_114.html?hl=es&id=eQ9RHwAACAAJ&redir_esc=y

[43] ITU-T, “TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS ,” THE INTERNATIONAL TELEGRAPH AND TELEPHONE CONSULTATIVE COMMITTEE.

[44] “Panel de control DVSwitch – M7SPI.” Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.m7spi.co.uk/dvswitch-dashboard/

[45] “Móvil@DVSwitch.groups.io | wiki.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://dvswitch.groups.io/g/Mobile/wiki/8719

[46] “GitHub - hp3icc/DVSMU: DVSwitch MultiUser Mod - DVSMU original code HL5KY /HL5BTF.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://github.com/hp3icc/DVSMU

ANEXOS

Anexo A. Datasheet USRP N210

En la Figura A1 se muestra las especificaciones del dispositivo USRPN210.



SPECIFICATIONS

Spec	Typ.	Unit
POWER		
DC Input	6	V
Current Consumption	1.3	A
w/ WBX Daughterboard	2.3	A
CONVERSION PERFORMANCE AND CLOCKS		
ADC Sample Rate	100	MS/s
ADC Resolution	14	bits
ADC Wideband SFDR	88	dBc
DAC Sample Rate	400	MS/s
DAC Resolution	16	bits
DAC Wideband SFDR	80	dBc
Host Sample Rate (8b/16b)	50/25	MS/s
Frequency Accuracy	2.5	ppm
w/ GPSDO Reference	0.01	ppm

Spec	Typ.	Unit
RF PERFORMANCE (W/ WBX)		
SSB/LO Suppression	35/50	dBc
Phase Noise (1.8 Ghz)		
10 kHz	-80	dBc/Hz
100 kHz	-100	dBc/Hz
1 MHz	-137	dBc/Hz
Power Output	15	dBm
IIP3	0	dBm
Receive Noise Figure	5	dB
PHYSICAL		
Operating Temperature	0 to 55°	C
Dimensions (l x w x h)	22x16x5	cm
Weight	1.2	kg

* All specifications are subject to change without notice.

Figura A1. Dispositivo USRP

Anexo B. Datasheet Raspberry Pi

En la Figura B1 se muestra las especificaciones de la Raspberry Pi.

Raspberry Pi

Raspberry Pi 3 Model B

Specifications

Processor	Broadcom BCM2387 chipset. 1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 802.11 b/g/n Wireless LAN and Bluetooth 4.1 (Bluetooth Classic and LE)
GPU	Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor. Provides Open GL ES 2.0, hardware-accelerated OpenVG, and 1080p30 H.264 high-profile decode. Capable of 1Gpixel/s, 1.5Gtexel/s or 24GFLOPs with texture filtering and DMA infrastructure
Memory	1GB LPDDR2
Operating System	Boots from Micro SD card, running a version of the Linux operating system or Windows 10 IoT
Dimensions	85 x 56 x 17mm
Power	Micro USB socket 5V1, 2.5A

Connectors:

Ethernet	10/100 BaseT Ethernet socket
Video Output	HDMI (rev 1.3 & 1.4 Composite RCA (PAL and NTSC)
Audio Output	Audio Output 3.5mm jack, HDMI USB 4 x USB 2.0 Connector
GPIO Connector	40-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header: 2x20 strip Providing 27 GPIO pins as well as +3.3 V, +5 V and GND supply lines
Camera Connector	15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)
Display Connector	Display Serial Interface (DSI) 15 way flat flex cable connector with two data lanes and a clock lane
Memory Card Slot	Push/pull Micro SDIO

Figura B1. Parámetros Raspberry Pi 3

En la Figura C1 se muestra el paquete de descarga requerido para capturar audio y transmitirlo.

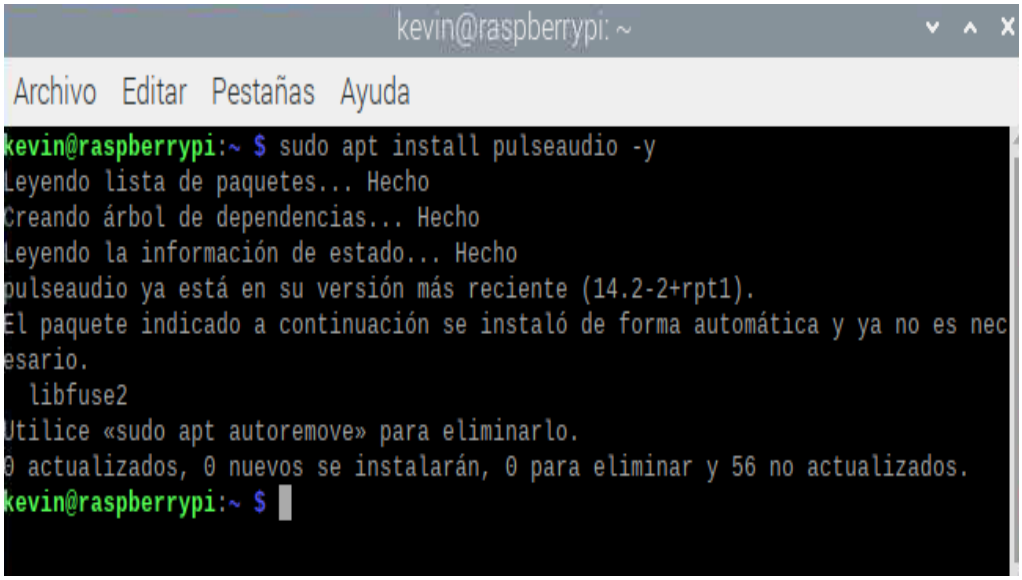


Figura C1. PulseAudio

Anexo D. Antena

En la Figura D1 se muestra las especificaciones de la antena vert2450 utilizada en el proyecto.

SPECIFICATION

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

Figura D1. Especificaciones de la antena vert2450

Anexo E. Gráficas de Ancho de Banda Tx Digital

En la Figura E1 se muestra el código desarrollado para la gráfica del espectro y ancho de banda de la transmisión digital de audio.

```python
import numpy as np              # Importa NumPy para cálculos numéricos y manejo de arreglos
import matplotlib.pyplot as plt # Importa Matplotlib para graficar
from scipy import signal        # Importa el módulo signal de SciPy para análisis de señales


# Activar estilo oscuro
plt.style.use("dark_background")# Activa el estilo de fondo oscuro en las gráficas

fs = 48000                      # Frecuencia de muestreo: 48 kHz (típica en audio digital)
t = np.arange(0, 1.0, 1/fs)     # Vector de tiempo desde 0 hasta 1 segundo con pasos de 1/fs
# Diccionario que contiene señales simuladas de distintos modos digitales
signals = {
    "DMR (4FSK, 12.5 kHz)": np.sin(2*np.pi*1000*t) + 0.5*np.random.randn(len(t)), # Señal DMR simulada: seno de 1 kHz + ruido
    "P25 (C4FM, 12.5 kHz)": np.sin(2*np.pi*2000*t) + 0.5*np.random.randn(len(t)), # Señal P25 simulada: seno de 2 kHz + ruido
    "D-Star (GMSK, 6.25 kHz)": np.sin(2*np.pi*3000*t) + 0.5*np.random.randn(len(t)), # Señal D-Star simulada: seno de 3 kHz + ruido
    "NXDN (4FSK, 6.25 kHz)": np.sin(2*np.pi*4000*t) + 0.5*np.random.randn(len(t)), # Señal NXDN simulada: seno de 4 kHz + ruido
}

fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 8)) # Crea una figura con 2 filas y 2 columnas de subgráficas
fig.suptitle("Espectrogramas comparativos por modo digital (bandas reales)", fontsize=16, color="white")
# Recorre cada subgráfica y cada señal del diccionario
for ax, (modo, sig) in zip(axs.flatten(), signals.items()):
    f, tt, Sxx = signal.spectrogram(sig, fs, nperseg=1024) # Calcula el espectrograma de la señal
    im = ax.pcolormesh(tt, f, 10*np.log10(Sxx), shading='gouraud', cmap="inferno") # Dibuja el espectrograma en escala logarítmica (dB)
    ax.set_ylim(0, 6000) # Limita el eje de frecuencia hasta 6 kHz
    ax.set_title(modo, color="white", fontsize=12) # Título de cada subgráfica con el modo digital
    ax.set_ylabel("Frecuencia [Hz]", color="white", fontsize=10) # Etiqueta del eje Y (frecuencia)
    ax.set_xlabel("Tiempo [s]", color="white", fontsize=10) # Etiqueta del eje X (tiempo)

# Barra de color a la derecha
cbar_ax = fig.add_axes([0.92, 0.15, 0.02, 0.7]) # Crea un eje adicional para la barra de color
fig.colorbar(im, cax=cbar_ax, label="Intensidad [dB]") # Agrega la barra de color indicando la intensidad en dB

plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.9, 1]) # Ajusta el diseño para que no se encimen los elementos
plt.show() # Muestra la gráfica final en pantalla
```

Figura E1. Código de TX en Python

Anexo F. Bloques de funciones utilizadas para la transmisión FM en GNURadio

En la Tabla F1 se muestra los bloques con las funciones correspondientes para realizar la transmisión FM en GNURadio.

Función	Descripción
Options	Este bloque permite configurar los parámetros generales del proyecto en GNU Radio. Define el lenguaje de programación utilizado (Python), el tipo de interfaz gráfica (QT GUI) y opciones de generación del flujo. Su función principal es establecer el entorno de ejecución del diagrama de bloques.
Variable	Este bloque define la frecuencia de muestreo global del sistema. El valor de 48 kHz es estándar en aplicaciones de audio digital y garantiza una adecuada calidad de señal, además de compatibilidad con los bloques de procesamiento y visualización.
Audio Source	Este bloque se encarga de capturar la señal de audio desde el dispositivo de entrada del sistema (micrófono). La señal se muestrea a 48 kHz, convirtiendo el sonido analógico en una señal digital.
Low Pass Filter	El filtro pasa bajo se utiliza para limitar el ancho de banda de la señal de audio de entrada. Esto permite eliminar componentes de alta frecuencia no deseadas y evitar distorsión durante el proceso de modulación FM.
Multiply Const	Este bloque multiplica la señal de entrada por una constante definida. Su función principal es ajustar la amplitud de la señal, permitiendo un control adecuado del nivel de audio antes de la modulación.
Rational Resampler	Este bloque permite realizar un cambio de frecuencia de muestreo mediante factores racionales de interpolación y decimación. Se utiliza para adaptar la tasa de muestreo del audio a los requerimientos del modulador FM.
High Pass Filter	El filtro pasa alto elimina componentes de baja frecuencia o posibles desplazamientos DC en la señal. Esto mejora la calidad del audio modulado.
NBFM Transmit	Este bloque realiza la modulación de Frecuencia Modulada de banda angosta (NBFM). Convierte la señal de audio en una señal FM compleja, utilizando parámetros como: • Tasa de audio • Tasa de cuadratura
UHD: USRP Sink	Este bloque representa la interfaz de transmisión hacia el hardware USRP. Se encarga de enviar la señal modulada al transmisor RF.
Throttle	Su función es evitar el uso excesivo del procesador y mantener una tasa de muestreo constante (48Khz) durante simulaciones.
QT GUI Frequency Sink	Permite visualizar el espectro de frecuencia de la señal en tiempo real. Se utiliza para analizar el comportamiento espectral de la señal FM. • FFT Size: 1024 • Bandwidth: 48 kHz

Tabla F1. Funciones correspondientes a la transmisión y recepción FM.