



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO
COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE**

Eduardo Andres Natareno Alvizures

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO
COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDUARDO ANDRES NATARENO ALVIZURES

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Christian Antonio Orellana López
EXAMINADOR	Ing. Walter Jacobo Galicia García
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 29 de noviembre de 2021.



Eduardo Andrés Natareno Alvizures

Guatemala, 3 de abril de 2022

Ingeniero
Julio Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

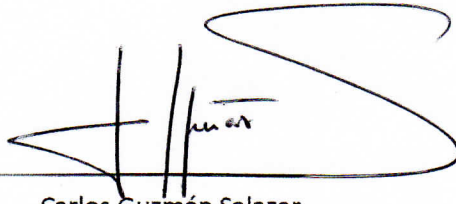
Estimado ingeniero Solares:

Hago de su conocimiento que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica, Eduardo Andrés Natareno Alvizures, titulado "Diseño de un Analizador de Espectro de 25MHZ de Bajo Costo, Utilizando Radio Definida por Software".

El cual cumple con los objetivos propuestos para su ejecución. Por lo que, doy mi APROBACIÓN al mismo.

Quedo en la mejor disposición de ampliar cualquier inquietud sobre el trabajo del estudiante Natareno Alvizures.

Reciba un cordial saludo.



Carlos Guzmán Salazar

ASESOR

CARLOS GUZMAN SALAZAR
Ingeniero Electricista
Col. No. 2762



Guatemala, 7 de abril de 2022

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE**, desarrollado por el estudiante **Eduardo Andres Natareno Alvizures**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio Solares Peñate'.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

REF. EIME 64.2022.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante Eduardo Andrés Natareno Alvizures: DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE, procede a la autorización del mismo.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 27 de septiembre de 2022.

LNG.DECANATO.OI.758.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTRO DE 25 MHZ DE BAJO COSTO, UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE**, presentado por: **Eduardo Andres Natareno Alvizures**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Arabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi carrera y permitirme culminar esta.
Mis padres	Violeta Alvizures y Humberto Natareno (q.e.p.d.) por todo el apoyo, los consejos, valores y el amor brindado durante todo el transcurso de mi vida.
Mis hermanos	Angela, Lorena y Johan por ser una parte importante en mi vida. Gracias por el apoyo y amistad.
Mis tíos y tías	Por todo el apoyo brindado durante mi vida y carrera profesional.
Mis amigos y compañeros de estudio	Por todo el apoyo brindado en mi vida estudiantil y hacer de esta una experiencia muy amena y llena de felicidad en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me formo como persona ética, responsable y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por permitirme desarrollar mi vida académica profesional dentro de sus aulas.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por todas las enseñanzas brindadas a lo largo de mi carrera profesional.
Ing. Carlos Guzmán	Por todo el apoyo, confianza y asesoría brindado en este trabajo y durante mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Dominio frecuencial	1
1.2. El espectro electromagnético	1
1.2.1. Frecuencias extremadamente bajas.....	2
1.2.2. Frecuencias de voz.....	3
1.2.3. Frecuencias muy bajas.....	3
1.2.4. Frecuencias bajas.....	3
1.2.5. Frecuencias intermedias.....	3
1.2.6. Frecuencias altas.....	3
1.2.7. Frecuencias muy altas.....	4
1.2.8. Frecuencias ultra altas.....	4
1.2.9. Frecuencias super altas.....	4
1.2.10. Frecuencias extremadamente altas.....	5
1.3. Longitud de onda.....	5
1.4. Análisis de señales.....	6
1.5. Señales senoidales	6
1.6. Analizador de espectro	7
1.7. Ondas periódicas no senoidales.....	8

1.8.	La serie de Fourier	9
1.9.	La transformada de Fourier	10
1.10.	Transformada discreta de Fourier	12
1.11.	Transformada rápida de Fourier.....	13
1.11.1.	Algoritmo de FFT mediante diezmado en el tiempo.....	14
1.11.2.	Algoritmo de FFT mediante diezmado en frecuencia.....	14
1.12.	Procesado digital de señales analógicas	14
1.12.1.	Conversión A/D	15
1.13.	Radio definida por software.....	15
1.14.	Antenas	17
1.14.1.	Antena de transmisión.....	19
1.14.2.	Antena de recepción	19
1.14.3.	Antena monopolo	20
2.	MARCO METODOLÓGICO	23
2.1.	Hardware.....	23
2.1.1.	NooElec NESDR USB Receive	23
2.1.1.1.	Especificaciones técnicas	26
2.1.1.2.	Sintonizador R820T2.....	26
2.1.1.3.	Demodulador RTL2832U.....	27
2.1.1.4.	Instalación en sistema operativo	27
2.1.1.4.1.	Windows.....	28
2.1.1.4.2.	Linux	32
2.1.1.5.	Antena monopolo telescópica	35
2.1.1.6.	Conector MCX.....	37
2.2.	Software.....	37
2.2.1.	GNU Radio Companion.....	38

2.2.1.1.	Concepto de bloque.....	39
2.2.1.2.	Interfaz.....	40
2.2.1.2.1.	Bloque Options.....	45
2.2.1.2.2.	Bloque Variable	47
2.2.1.2.3.	Herramientas de análisis	47
2.2.1.2.4.	Instalación en sistemas operativos Windows.....	49
2.2.1.2.5.	Instalación en sistemas operativos Linux.....	51
3.	DISEÑO DE ANALIZADOR DE ESPECTRO	55
3.1.	Ejecución de GNU Radio en Windows 10	55
3.2.	Diseño de diagrama de flujo en GNU Radio.....	56
3.2.1.	Configuración de bloque <i>Options</i>	56
3.2.2.	Configuración de bloque Variable.....	57
3.2.3.	Configuración de bloque WX GUI Slider.....	57
3.2.3.1.	Configuración de ganancia RF	58
3.2.3.2.	Configuración rango de frecuencia	59
3.2.3.3.	Configuración de ancho de banda	60
3.2.4.	Configuración de bloque Osmocom Source	61
3.2.5.	Conexión entre bloques.....	64
3.2.6.	Configuración de bloque Throttle	65
3.2.7.	Configuración de bloque WX GUI FFT Sink	66
3.2.8.	Configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink....	68
3.3.	Conexión de hardware RTL-SDR a computadora	70

3.3.1.	Conexión de antena monopolo telescópica a RTL-SDR.....	71
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
4.1.	Resultado de ejecución de diagrama de flujo en GNU Radio ..	73
4.1.1.	Interfaz de bloque WX GUI Slider	74
4.1.2.	Interfaz de bloque WX GUI FFT Sink	75
4.1.3.	Interfaz de bloque WX GUI Waterfall Sink	76
4.2.	Resultados de pruebas a análisis de radio comercial FM	78
4.2.1.	Prueba en frecuencia de 88.1 MHz y 107.7 MHz	78
4.3.	Resultados de pruebas a análisis de radiodifusión televisiva...	80
4.4.	Resultados de pruebas a análisis de llave RF	83
5.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	85
	CONCLUSIONES.....	89
	RECOMENDACIONES	91
	REFERENCIAS	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Espectro electromagnético de frecuencias.....	2
2.	Espectro electromagnético de longitudes de onda.....	6
3.	Representación en el dominio de la frecuencia, espectro, de una onda senoidal de frecuencia única.....	8
4.	Efecto de incrementar T en el espectro de los trenes de pulsos.....	11
5.	Implementación de DFT e IDFT.....	13
6.	Configuración física de la conversión A/D.....	15
7.	Concepto de radio definida por software.....	17
8.	Antena como red de cuatro terminales.....	18
9.	Circuito equivalente a una antena de transmisión.....	19
10.	Circuito equivalente a una antena de recepción.....	20
11.	Antena aterrizada de cuarto de onda: ondas estacionarias de voltaje y corriente.....	21
12.	Antena aterrizada de cuarto de onda: distribución de la radiación.....	21
13.	Esquema RTL-SDR general.....	24
14.	Diagrama de bloques RTL-SDR.....	25
15.	NooElec NESDR USB RTL-SDR.....	25
16.	NooElec NESDR.....	28
17.	Ventana de instalador Zadig.....	29
18.	Listar todos los dispositivos del menu opciones.....	29
19.	Busqueda de dispositivo por nombre RTL2832U.....	30
20.	Identificación por USB ID.....	31
21.	Instalación de controlador.....	31

22.	Lista de dispositivos por medio de comando lsub.....	32
23.	Lista de drivers.....	33
24.	Agregado de lista negra.....	34
25.	Ejecución de comando rtl_test.....	35
26.	Antena de látigo o telescópica	36
27.	Conector MCX macho y hembra respectivamente	37
28.	GNU Radio Companion	39
29.	Esquema de bloques utilizado por GNU Radio.....	40
30.	Barra de herramientas interfaz GNU Radio Windows.....	40
31.	Icono de error de diagrama de flujo	41
32.	Icono de generación de diagrama de flujo	41
33.	Icono de Run	41
34.	Icono de habilitar y deshabilitar respectivamente	42
35.	Icono de Bypass	42
36.	Panel de consola interfaz GNU Radio Windows.....	42
37.	Ventana de variables interfaz GNU Radio	43
38.	Librería interfaz GNU Radio Windows	43
39.	Área de trabajo interfaz GNU Radio Windows.....	44
40.	Interfaz general GNU Radio Windows	44
41.	Interfaz general GNU Radio Linux	45
42.	Bloque Options	46
43.	Propiedades de bloque Options.....	46
44.	Ejemplos de tipo de variable y color	47
45.	Página oficial de GNU Radio	50
46.	Instalador GNU Radio versión 3.7 para Windows.....	50
47.	Repositorio GNU Radio 3.9	51
48.	Actualización de fuentes Apt.....	51
49.	Instalación GNU Radio	52
50.	Instalación de Python en Linux	52

51.	Construyendo los repositorios Osmocom.....	52
52.	Resumen de componentes	53
53.	Instalación de Osmocom.....	53
54.	Icono GNU Radio en Windows 10.....	55
55.	Ventana de ejecución en Windows 10	55
56.	Configuración de bloque options.....	57
57.	Configuración de Ganancia RF	59
58.	Configuración de rango de frecuencia.....	60
59.	Configuración de ancho de banda	61
60.	Configuración de bloque Osmocom Source.....	64
61.	Conexión entre bloques	65
62.	Configuración de bloque Throttle	66
63.	Configuración de bloque WX GUI FFT Sink.....	68
64.	Configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink	70
65.	Conexión de RTL-SDR con extensión USB	71
66.	Conexión de antena monopolo telescópica a RTL-SDR	72
67.	Diagrama de flujo completo del diseño del analizador de espectro en GNU Radio.....	73
68.	Icono para detener ejecución de programa.....	74
69.	Panel de consola en ejecución de proyecto	74
70.	Interfaz gráfica de bloque WX GUI Slider.....	75
71.	Interfaz gráfica de bloque WX GUI FFT Sink	76
72.	Interfaz gráfica de bloque WX GUI Waterfall Sink.....	77
73.	Resultado de análisis en 88.1 MHz.....	79
74.	Resultado de análisis en 107.7 MHz.....	80
75.	Resultado de análisis a portadora de video canal 3 VHF.....	82
76.	Resultado de análisis a portadora de audio canal 3 VHF.....	83
77.	Resultado de análisis a llave RF 315 MHz.....	84

TABLAS

I.	Especificaciones técnicas NooElec SDR USB.....	26
II.	Descripción y configuración de parámetros de bloque Options	56
III.	Parámetros de bloque WX GUI Slider	58
IV.	Configuración de Ganancia RF.....	58
V.	Configuración de rango de frecuencia	59
VI.	Configuración de ancho de banda	60
VII.	Descripción y configuración de bloque Osmocom Source.....	62
VIII.	Parámetros y configuración de bloque Throttle	65
IX.	Parámetros y configuración de bloque WX GUI FFT Sink	67
X.	Parámetros y configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink	69
XI.	Parámetros de visualización interfaz gráfica de bloque WX GUI FFT Sink	75
XII.	Parámetros de visualización interfaz grafica de bloque WX GUI Waterfall Sink.....	76
XIII.	Configuración de Sliders para análisis de 88.1 MHz FM	78
XIV.	Configuración de Sliders para análisis de 107.7 MHz FM	79
XV.	Radiodifusión de canal 3 en banda VHF.....	81
XVI.	Configuración de Sliders para análisis de canal 3 VHF portadora de video	81
XVII.	Configuración de Sliders para análisis de canal 3 VHF portadora de audio	81
XVIII.	Radiodifusión de información por medio de llave RF 315 MHz	84
XIX.	Configuración de Sliders para análisis de llave RF	84
XX.	Hardware utilizado en el diseño con computadora	85
XXI.	Hardware utilizado en el diseño si el usuario tiene computadora	86
XXII.	Software utilizado en el diseño con sistema operativo Windows o Linux	86

XXIII.	Costo de diferentes equipos para análisis de espectro	87
XXIV.	Costo – beneficio de NooElec SDR por equipo	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A/D	Analógico-Digital
cm	Centímetro
A_n	Coeficiente de serie de Fourier para coseno
B_n	Coeficiente de serie de Fourier para seno
π	Constante matemática pi
I	Corriente eléctrica
dB	Decibel
α	Desplazamiento de fase para coseno
β	Desplazamiento de fase para seno
d	Diferencial de una unidad
e	Exponencial
f	Frecuencia
GB	Gigabytes
GHz	Gigahercio
Hz	Hercio
∞	Infinito
∫	Integral
KHz	Kilohercio
λ	Longitud de onda
MHz	Megahercio
j	Número complejo
ppm	Partículas por millón
Ω	Resistencia eléctrica

T	Tiempo
A₀	Valor promedio de c.d.
ω	Velocidad angular
c	Velocidad de la luz
V	Voltaje eléctrico

GLOSARIO

ADC	Sistema conversor analógico a digital.
Algoritmo	Conjunto de operaciones lógicas que determinan un cálculo y resuelven un problema.
Amplificación	Ampliar la intensidad de un fenómeno físico por medio de otro elemento activo.
Amplitud	En señales eléctricas es la variación máxima de la magnitud física que varía periódicamente con el tiempo.
Analógico	Cualquier información o señal que pasa de un valor a otro con valores intermedios continuos.
Ancho de banda	Capacidad de un sistema de recibir o transmitir información.
ASK	Modulación por desplazamiento de amplitud. Se le conoce como <i>Amplitude-Shift Keying</i> por sus siglas en inglés.
Banda	Intervalos de frecuencias asignados dentro del espectro electromagnético para diferentes usos en radiocomunicaciones.

Binario	Sistema que utiliza únicamente dos valores para interpretar información, 0 y 1.
Bios	Sistema básico de entrada y salida. Se le conoce de esta manera por sus siglas en inglés.
Bit	Unidad mínima de información, solo puede tener el valor de 0 y 1.
Bloque	En programación, es la sección de un código o algoritmo para realizar una operación de entrada y/o salida de datos.
c.d.	Corriente directa, también se le encuentra por sus siglas DC.
Canal	Es la frecuencia de trabajo a emplear en una radiodifusión.
CB	Banda civil, utilizada para comunicaciones de radio personal o comercial, conocida en inglés como <i>Citizen Band</i> .
Ciclo	Repetición de cualquier fenómeno físico periódico.
Complex	Cualquier valor o resultado complejo.
Comunicaciones	Transferencia de información entre dos o más puntos.

Conductor	Material que ofrece poca resistencia al paso de corriente eléctrica.
Consola	Medio por el cual se puede dar instrucciones a un programa informático en un computador.
Corriente	Flujo de electrones que atraviesan un conductor eléctrico o un espacio, expresado en amperios.
CPU	Unidad central de proceso, es donde se encuentran los elementos para el procesamiento de datos en un computador. Se le conoce como <i>Central Processing Unit</i> por sus siglas en inglés.
Deflexión	Desviación de la dirección de una magnitud física.
Demodulación	Recuperación de información transportada por una onda portadora.
Diezmado	Para el cálculo de la transformada de Fourier, es el proceso de divisiones sucesivas de una señal.
Digital	Son todos los sistemas que utilizan el sistema binario para almacenar o transferir información. Solo utilizan valores discretos.
Directividad	Potencia radiada por una antena en un ángulo específico.

Drivers	En español se conocen como controladores. Son un archivo pequeño que está en cada parte del hardware.
DVB-T	Difusión de video digital terrestre. Por sus siglas en inglés <i>Digital Video Broadcasting-Terrestrial</i> .
EMI	Interferencia electromagnética. Por sus siglas en inglés <i>Electromagnetic Interference</i> .
EHF	Frecuencias extremadamente altas. Por sus siglas en ingles <i>Extremely High Frequencies</i> .
ELF	Frecuencias extremadamente bajas. Por sus siglas en ingles <i>Extremely Low Frequencies</i> .
Fibra óptica	Medio para transmitir información por medio de pulsos de luz a través de hilos de fibra de vidrio a largas distancias.
Float	Cualquier valor o resultado numérico decimal.
FM	Modulación por frecuencia. Por sus siglas en inglés <i>Frequency Modulation</i> .
FSK	Modulación por desplazamiento de frecuencia. Por sus siglas en inglés <i>Frequency-Shift Keying</i> .
Ganancia	Potencia entregada por una antena.

GNU Radio	Herramienta utilizada en los sistemas operativos libres, ya que brinda bloques de procesamiento para la señal y de esta manera implementar sistemas de radio.
GPL	Licencia publica general. Por sus siglas en inglés <i>General Public Licence</i> .
GUI	Interfaz gráfica de usuario. Por sus siglas en inglés <i>Grafic User Interface</i> .
Hardware	Conjunto de materiales físicos de una computadora o sistema informático.
HF	Frecuencias altas. Por sus siglas en ingles <i>High Frequencies</i> .
IF	Frecuencia intermedia. Por sus siglas en inglés <i>Intermediate Frequency</i> .
IQ	Cuadratura de componentes I y Q. Utilizado en modulación digital.
Lenguaje	En informática, es utilizado para describir una serie de instrucciones que un equipo informático debe ejecutar.
Librería	Es uno o varios archivos que contienen diversas funcionalidades en un lenguaje de programación determinado.

LF	Frecuencias bajas. Por sus siglas en ingles <i>Low Frequencies</i> .
Linux	Es un software de código abierto, multitarea, multiplataforma y multiusuario. Es una serie de sistemas operativos.
LNA	Amplificador de bajo ruido. Por sus siglas en inglés <i>Low Noise Amplifer</i> .
MCX	Conector micro-coaxial.
MF	Frecuencias medias. Por sus siglas en ingles <i>Medium Frequencies</i> .
Modulación	Envío de información por medio de onda portadora y variaciones a los parámetros de la misma.
Muestreo	Toma de valores de una señal, cada cierto tiempo.
OSMOCOM	Comunicaciones móviles de código abierto. Por sus siglas en inglés <i>Open Source Mobile Communication</i> .
Parámetro	Condición que modifica una variable.
PC	Definición de computadora personal.
PLL	Lazo de seguimiento de fase. Por sus siglas en inglés <i>Phase-Locked Loop</i> .

Portadora	Señal encargada de transportar la información a transmitir.
PSK	Modulación por desplazamiento de fase. Por sus siglas en inglés <i>Phase-Shift Keying</i> .
Puerto	En informática, es la interfaz por el cual se pueden recibir y enviar información.
Python	Lenguaje de programación interpretado y orientado a objetos.
QAM	Modulación de amplitud por cuadratura. Por sus siglas en inglés <i>Quadrature Amplitude Modulating</i> .
Radiación	Combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio, transportando energía.
Rayos catódicos	Corrientes de electrones a través de tubos vacíos.
Resolución	Es el número de bits utilizados para almacenar cada muestra de una señal.
RF	Siglas de radiofrecuencia.
<i>Sample Rate</i>	Tasa de muestreo.

SDR	Radio definida por software. Por sus siglas en inglés <i>Software Defined Radio</i> .
Sintonizador	Es un sistema para recepción de frecuencias de radio.
SHF	Frecuencias super altas. Por sus siglas en ingles <i>Super High Frequencies</i> .
SMA	Conector coaxial sub-miniatura versión A.
Software	Conjunto de programas o rutinas para que la computadora realice una cadena de tareas.
Ubuntu	Distribución de Linux, usado en ordenadores y servidores.
UHF	Frecuencias ultra altas. Por sus siglas en ingles <i>Ultra High Frequencies</i> .
USB	Periférico que permite conectar diferentes dispositivos del mismo tipo a un ordenador. De las siglas en inglés <i>Universal Serial Bus</i> .
USRP	Periférico de radio de software universal. De las siglas en inglés <i>Universal Software Radio Peripheral</i> .
Variable	Valor o dato que este sujeto a cambios frecuentes.

VF	Frecuencias de voz. Por sus siglas en ingles <i>Voice Frequencies</i> .
VHF	Frecuencias muy altas. Por sus siglas en ingles <i>Very High Frequencies</i> .
VLf	Frecuencias muy bajas. Por sus siglas en ingles <i>Very Low Frequencies</i> .
Voltaje	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, expresado en voltios.
<i>Waterfall</i>	En GNU Radio, es un tipo de visualización de espectro con forma de cascada.
Windows	Distribuciones de software desarrollados por Microsoft disponibles en varias arquitecturas.
Zadig	Plataforma para diversas herramientas de USB genéricas para ayudar en el control.

RESUMEN

Los analizadores de espectro son utilizados ampliamente para la investigación, desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías inalámbricas, tanto en el espectro de las radiofrecuencias como en el espectro de las microondas. Sus alcances son bastante amplios, siempre se basan en el procesamiento digital de señales.

En el primer capítulo se definirán los conceptos de onda electromagnética en el dominio frecuencial y del tiempo; también se muestran los diferentes parámetros físicos y matemáticos de esta. Se estudiará el análisis de señales con el espectro electromagnético por medio de series y transformadas de Fourier; así mismo, los algoritmos como la transformada rápida de Fourier para procesamientos digitales de señales. Se definirá cómo funciona un procesador digital de señales.

En el segundo capítulo se definirá el hardware y software que se utilizará, específicamente se verán los parámetros de uso como rango de frecuencias de recepción, ganancia, arquitectura interna, entre otras características importantes del dispositivo. Se definirá el tipo de antena que se utilizará para la recepción de señales. Asimismo, se definirá la instalación del hardware, los pasos de instalación en sistemas operativos Windows y Linux para su correcto funcionamiento. Por último, se definirá el software de GNU Radio que se usará junto a sus herramientas.

En el tercer capítulo se llevará a cabo el diseño del analizador de espectro, por tanto, se hará una guía para explicar el funcionamiento de cada proceso.

También se verá la configuración respectiva conforme se avance en el diseño, todo a nivel de software en GNU Radio. Por otra parte, se verá la parte de hardware y la conexión de la antena para la recepción de señales.

En el cuarto capítulo se realizarán análisis de pruebas y resultados al analizador de espectro implementado, las cuales se comprenden en su rango de funcionamiento y sus características previas ya vistas, por ello, se verificarán algunos de sus alcances más importantes. Mientras que en el quinto capítulo se analizará el precio final del analizador de espectro con el proveedor y sus accesorios.

OBJETIVOS

General

Diseñar un analizador de espectro de 25 MHz de bajo costo utilizando radio definida por software.

Específicos

1. Realizar el estudio y alcance técnico de los dispositivos a utilizar como receptores de señales de frecuencia.
2. Realizar el estudio y alcances del software que se utilizará para el procesamiento de señales y su visualización.
3. Diseñar la interfaz para el analizador de espectro por medio del software que se usará.
4. Realizar pruebas en el analizador de espectro para verificar su rango de aplicación.
5. Calcular y comparar los costos totales de aplicación del analizador de espectro para demostrar que es de bajo costo.

INTRODUCCIÓN

Para el estudio de frecuencias existen equipos dedicados de marcas reconocidas y con amplios rangos de frecuencia de detección. Sin embargo, los costos de adquisición de estos equipos son elevados, por lo que para solventar esta situación se hará énfasis en un dispositivo específico, el cual su costo de adquisición es accesible para cualquier tipo de persona: estudiantes, radioaficionados, entre otros. Para el uso del dispositivo se emplea un software libre sin limitantes de diseño, ya que en sí el dispositivo es solo un receptor y procesador de señales.

Surge, entonces, la necesidad de adquirir equipos de medición y análisis de frecuencias electromagnéticas para fines de estudio o afición. Por medio de un procesamiento digital y software se puede obtener un resultado visible y confiable con el cual tener características de interés sobre un espectro de frecuencia seleccionado.

La tecnología de radio definida por software permite que algunos componentes electrónicos sean reemplazados por programas de computadora. Por tanto, el objetivo es proporcionar soluciones flexibles para la innovación en el diseño e implementación de los sistemas de comunicación inalámbricos, así también reducir los costos de adquisición. Por ello, darán las bases y se analizarán los bloques necesarios para llevar a cabo el estudio y hacer efectivo y eficiente un analizador de espectro convencional, el cual sea de bajo costo y de fácil diseño.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Dominio frecuencial

La información contenida en el dominio de la frecuencia es útil, como ilustración, si se conoce la respuesta en frecuencia de un canal de comunicación, es posible determinar las frecuencias enviadas sin distorsión apreciable.

El análisis espectral es otro ejemplo de la utilidad del dominio de la frecuencia. El espectro de frecuencias de una señal proporciona información en campos como radiocomunicaciones, reconocimiento de voz, audio, astronomía y otras áreas de la ciencia y la tecnología, que se benefician directamente, del conocimiento de los componentes espectrales de una señal.

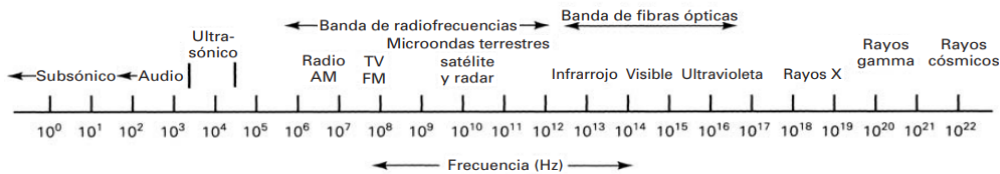
1.2. El espectro electromagnético

El sistema electrónico de comunicaciones tiene como objetivo transferir información dentro de un grupo de lugares. El proceso que conlleva corresponde con la conversión de la información original en energía electromagnética, de esta manera se logra transmitir en estaciones receptoras, en donde la información vuelve a su estado original. Si bien, la energía electromagnética puede esparcir, tanto como voltaje como corriente, mediante un hilo metálico o un conductor. Sin embargo, también puede ser por ondas de radio que son emitidas en un espacio libre; asimismo, pueden ser ondas luminosas por medio de una fibra óptica.

En ese sentido, este tipo de energía también se distribuye a manera de intervalo semi infinito de frecuencias. Ahora bien, se considera que la frecuencia

es el número de veces en las que sucede un movimiento periódico, por ejemplo, se puede mencionar la onda senoidal. Por tanto, cuando se completa una inversión de la onda, se conoce como ciclo; mientras que el hercio es considerado como la unidad básica de la frecuencia, por lo cual es igual a un ciclo por segundo. Dentro del campo de la electrónica se tiene como costumbre el uso de prefijos métricos que representen grandes frecuencias, por ejemplo, el kilohercio, KHz, indica miles de hercios, mientras que el megahercio, MHz, indica los millones.

Figura 1. **Espectro electromagnético de frecuencias**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p. 5.

El espectro de frecuencias se subdivide en subsecciones o bandas. El espectro total tiene diferentes usos, sin embargo, la utilidad de las radiofrecuencias RF debe distribuirse en bandas de frecuencia, que son más estrechas, a estas se les debe asignar nombres y números que las describan; pero algunas todavía presentan una subdivisión adicional para diversos tipos de servicio.

1.2.1. Frecuencias extremadamente bajas

Las frecuencias extremadamente bajas se conocen de esa manera, ya que su intervalo es de 30 a 300 Hz; por lo tanto, abarcan señales de distribución electrónica, 60 Hz, por ello, también las de telemetría de baja frecuencia.

1.2.2. Frecuencias de voz

Por otro lado, las frecuencias de voz son signos que abarcan el intervalo desde 300 hasta 3,000 Hz, por tanto, engloban a todas aquellas que son asociadas a la voz humana. En ese sentido, los canales telefónicos normales comprenden el mismo ancho de banda.

1.2.3. Frecuencias muy bajas

Las frecuencias muy bajas se destacan por estar entre los límites de 3 a 30 KHz, los cuales abarcan el extremo superior que comprende el límite que puede escuchar un humano. Este tipo de frecuencia son utilizadas para sistemas especiales y en espacios autorizados, tales como la milicia o el gobierno.

1.2.4. Frecuencias bajas

Por otro lado, las frecuencias bajas se utilizan para la navegación marítima y en la aeronáutica, ya que se encuentra entre el intervalo que abarca desde 30 hasta 300 KHz.

1.2.5. Frecuencias intermedias

Las frecuencias intermedias, son las comunes en las emisiones comerciales de radio AM, ya que este espacio abarca desde los 300 KHz hasta los 3 MHz.

1.2.6. Frecuencias altas

Ahora bien, las frecuencias altas son las que se encuentran dentro del intervalo de 3 a 30 MHz, las cuales reciben el nombre de ondas cortas. En su

mayoría se encuentran dos sentidos del intervalo en las radiocomunicaciones. Asimismo, otros ejemplos de estas frecuencias están en la banda civil CB y en los radioaficionados.

1.2.7. Frecuencias muy altas

Las frecuencias muy altas son aquellas que abarcan desde los 30 hasta los 300 MHz, por tanto, son utilizadas en las radios móviles, en la emisión comercial FM y en las marinas y aeronáuticas. Asimismo, se encuentran en la emisión televisiva del rango de canales del 2 al 13.

1.2.8. Frecuencias ultra altas

Las frecuencias ultra altas tienen sus límites entre los 300 MHz hasta 3 GHz. Por tanto, este tipo de frecuencia es utilizado para la emisión comercial televisiva que comprende el rango de canales del 14 al 83. Asimismo, se encuentra en los servicios móviles de las comunicaciones terrestres, en los móviles celulares, en unos sistemas de radar y navegación, así como en los sistemas de radio por microondas y por satélite. Por tanto, se estima que estas frecuencias, las mayores de 1 GHz, corresponden a las microondas, por ello, se incluye el extremo superior de dicho intervalo de UHF.

1.2.9. Frecuencias super altas

Las frecuencias super altas abarcan las señales que van desde los 3 hasta los 30 GHz, por ello, en su mayoría, este tipo de frecuencia se encuentra en los sistemas de radiocomunicaciones por microondas y en los satelitales.

1.2.10. Frecuencias extremadamente altas

Las frecuencias extremadamente altas son aquellas que están en el rango de los 30 y 300 GHz, por ello, su uso se extiende a ciertas aplicaciones complejas, de alto costo y que son especializadas.

1.3. Longitud de onda

Las unidades que se utilizan cuando se está trabajando con ondas de radio son las unidades de longitud de onda. Esta unidad corresponde a la distancia que ocupa, en el espacio, un ciclo de onda electromagnética. En otras palabras, es la distancia que existe entre los puntos correspondientes en una onda repetitiva. Asimismo, esta longitud es proporcional a la frecuencia y su velocidad de propagación. Existe la suposición en la que la velocidad de propagación dentro de un espacio libre es de 3×10^8 m/s. Por tanto, la manera matemática en que se expresa la relación que hay entre la frecuencia, la longitud y la velocidad de onda es la siguiente:

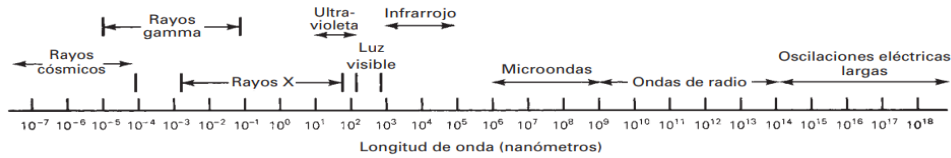
$$\text{longitud de onda} = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}} \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

Donde:

- λ = longitud de onda en metros por ciclo.
- c = velocidad de la luz: 300,000,000 metros por segundo.
- f = frecuencia en hercios.

Figura 2. **Espectro electromagnético de longitudes de onda**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 7.

1.4. **Análisis de señales**

Al momento de diseñar los circuitos electrónicos de comunicaciones, constantemente, se debe examinar y predecir todo lo que corresponde al funcionamiento del circuito, ya que es la base de la distribución de la potencia y es fundamental para la composición de las frecuencias de la señal informativa. Para este proceso utiliza el método matemático de análisis de señales; a pesar de que las señales en las comunicaciones electrónicas no corresponden a ondas senoidales, un pequeño porcentaje sí lo es. Por tanto, las que no son parte de dicho porcentaje se representan con la combinación de funciones de seno y coseno.

1.5. **Señales senoidales**

En esencia, todo lo que implica el estudio de las señales abarca el análisis matemático de frecuencia, longitud de onda y valor de voltaje de una señal. Las variaciones de voltaje o de corriente son señales electrónicas, las cuales se pueden mostrar en la serie de ondas seno o coseno. La descripción matemática de una onda de voltaje o de corriente con frecuencia única es la siguiente:

$$v(t) = V \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1.3)$$

$$v(t) = V \cos(2\pi ft + \theta) \quad (1.4)$$

$$i(t) = I \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1.5)$$

$$i(t) = I \cos(2\pi ft + \theta) \quad (1.6)$$

Donde:

- $v(t)$ = voltaje de la onda senoidal, variable respecto al tiempo t .
- $i(t)$ = corriente de la onda senoidal, variable respecto al tiempo t .
- V = voltaje máximo en volts.
- f = frecuencia en hercios.
- θ = desplazamiento de fase en radianes.
- I = corriente máxima en amperes.
- $2\pi f = \omega$ velocidad angular en radianes por segundo.

Las fórmulas que se mostraron anteriormente se utilizan para la onda repetitiva de solo una frecuencia. Asimismo, a este tipo de onda se le conoce como onda periódica, ya que se repite rápidamente de una forma uniforme. Es decir, el ciclo sucesivo de la señal se extiende precisamente al mismo tiempo de sus variaciones de amplitud. Por ello, cada ciclo tiene con exactitud la misma forma. Claros ejemplos de esto se encuentran en la serie de ondas seno, coseno o cuadradas. Este tipo de ondas también se pueden estudiar con el dominio del tiempo. Del mismo modo, la mayoría requiere pasar, primero, por el dominio del tiempo para luego estar en el de la frecuencia.

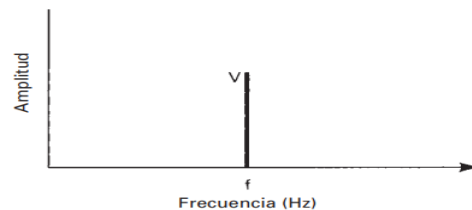
1.6. Analizador de espectro

Al instrumento de dominio de la frecuencia se le conoce como analizador de espectro. Este instrumento no muestra ningún despliegue en cuanto a la forma de la onda en la pantalla de tubo de rayos catódicos. En cambio, el instrumento

muestra una gráfica de amplitud contra frecuencia, por tanto, esta se tiene el nombre de espectro de frecuencia. El eje horizontal de este utensilio indica la frecuencia, mientras que el eje vertical, la amplitud. Consecuentemente, se producirá una deflexión vertical para cada frecuencia existente en la entrada.

Las frecuencias cuando están presentes en la forma de onda producen una línea vertical en la pantalla explicada anteriormente, por tanto, también se conocen los componentes espectrales. Ahora bien, la altura, también conocida como deflexión vertical, de cada línea tiene una proporción equivalente a la amplitud de la frecuencia que presenta. Esta representación muestra el dominio de la frecuencia que tiene la onda, ya que muestra el contenido de la frecuencia. Sin embargo, no indica la forma o la amplitud que se combina con base en los componentes de entrada.

Figura 3. **Representación en el dominio de la frecuencia (espectro) de una onda senoidal de frecuencia única**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 15.

1.7. Ondas periódicas no senoidales

Las ondas periódicas no senoidales, o también ondas complejas, son aquellas ondas repetitivas que se forman por más de una onda senoidal, las

cuales se relacionan armónicamente. El análisis de este tipo de onda necesita el uso de una serie matemática, la cual se conoce como serie de Fourier.

1.8. La serie de Fourier

La serie de Fourier se utiliza para el análisis de señales con el objetivo de presentar los componentes senoidales de una onda periódica no senoidal. En otras palabras, esta serie ayuda al cambio de una señal dentro del dominio del tiempo para estar en el dominio de la frecuencia. Por tanto, con esta serie se puede tener cualquier función periódica en forma de serie de funciones trigonométricas con la siguiente forma matemática:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos \alpha + A_2 \cos 2\alpha + A_3 \cos 3\alpha + \dots + A_n \cos n\alpha + B_1 \sin \beta + B_2 \sin 2\beta + B_3 \sin 3\beta + \dots + B_n \sin n\beta \quad (1.7)$$

Donde: $\alpha = \beta$. La ecuación anterior muestra la forma de la onda $f(t)$ que comprende el valor promedio A_0 de cd. Ahora bien, cuando hay una serie de funciones cosenoidales, las cuales tienen el término sucesivo, presentan una frecuencia que termina en múltiplo entero que corresponde a la frecuencia del primer término cosenoidal de dicha serie. Asimismo, una serie de funciones senoidales que presenta, en sus términos sucesivos, muestra la frecuencia en múltiplo entero del primer término senoidal. Por tanto, no hay restricciones en cuanto a valores se refiere, ya que las amplitudes de dichos términos.

La ecuación 1.7 se enuncia de la siguiente manera: cualquier tipo de forma de onda periódica se forma a partir de un componente promedio y también por una serie de ondas senoidales y cosenoidales que se relacionan armónicamente. En ese sentido, la armonía se caracteriza por ser un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Esta frecuencia es la primera armónica por lo que es igual a la frecuencia de la forma de la onda. Ahora bien, el segundo múltiplo de

la fundamental se conoce como segunda armónica, por tanto, los siguientes siguen la misma lógica. Los coeficientes A_0 , B_1 a B_n , y A_1 a A_n se pueden evaluar con las siguientes fórmulas integrales:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.8)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (1.9)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (1.10)$$

1.9. La transformada de Fourier

La serie de Fourier se usa para representar los componentes de frecuencia de una señal periódica. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones, las señales no son periódicas. Para representar las componentes de frecuencia de una señal determinista no periódica, se emplea la transformada de Fourier. La transformada de Fourier de una señal no periódica puede ser vista como la serie de Fourier exponencial compleja de una señal periódica cuyo período se acerca al infinito. Se define un ciclo de esta señal periódica por la señal no periódica.

El espectro se vuelve tan denso que los componentes espectrales están espaciados a intervalos infinitesimales. Como la frecuencia fundamental se acerca a cero, la frecuencia discreta se aproxima a la frecuencia continua y la suma se convierte en una integral. El espectro resultante consiste en un rango continuo de frecuencias y puede incluir una continuidad de frecuencias que van de $-\infty$ al $+\infty$. Para una función no periódica $T \rightarrow \infty$ se obtiene:

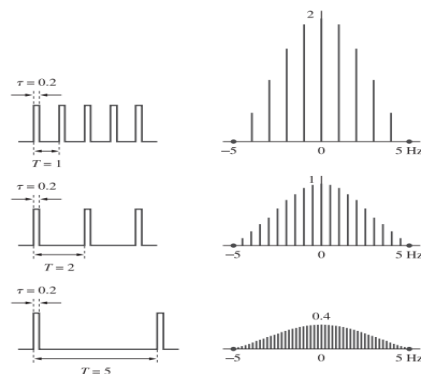
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.11)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-j\omega t} d\omega \quad (1.12)$$

La primera integral que se obtiene $F(\omega)$ se le conoce como transformada de Fourier de $f(t)$, mientras que a la segunda se le nombra como transformada inversa de Fourier. Ahora bien, en cuanto al cuadrado $f^2(t)$ brinda una idea de la manera en cómo la energía se contiene en la onda que se distribuye en el tiempo, mientras que $F^2(\omega)$ da una imagen de cómo la energía se va distribuyendo en el espectro de frecuencias. Naturalmente:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (1.13)$$

Figura 4. **Efecto de incrementar T en el espectro de los trenes de pulsos**



Fuente: L. Balmer. *Signals and Systems: An Introduction* [Londres: Prentice-Hall, 1991]. p. 229.

1.10. Transformada discreta de Fourier

Las computadoras personales otorgan cierta conveniencia en la disponibilidad de circuitos integrados destinados al procesamiento digital de señales, en ese sentido, el espectro de la forma de onda se aproxima por el uso de la transformada discreta de Fourier DFT.

La DFT se puede emplear a partir del cálculo de las muestras de una transformada continua de Fourier, ecuación 1.11. Los valores para los coeficientes complejos de la serie de Fourier. La transformada discreta de Fourier está definida mediante:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{k=N-1} f(k) e^{-j(2\pi/N)nk} \quad (1.14)$$

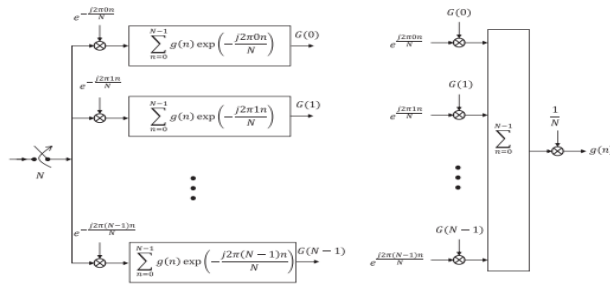
donde $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, y la transformada discreta inversa de Fourier IDFT está definida por:

$$f(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} F(n) e^{-j(2\pi/N)nk} \quad (1.15)$$

donde $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

El tiempo y la frecuencia no aparecen explícitamente debido a que las ecuaciones 1.14 y 1.15 son únicamente definiciones implementadas en una computadora digital que calcula N valores que corresponden a la DFT.

Figura 5. Implementación de DFT e IDFT



Fuente: GRAMI, Ali. *Introduction to Digital Communications* [Elsevier Inc, 2016]. p 115.

1.11. Transformada rápida de Fourier

La transformada discreta de Fourier DFT es importante para el diseño, la realización y el análisis tanto de los sistemas como de los algoritmos de tratamiento de las señales en tiempo discreto. Es importante el hecho de que existen algoritmos eficientes para el cálculo explícito de la DFT. El objetivo principal de este apartado es una clase de algoritmos particularmente eficientes para el cómputo digital de una DFT de N puntos. Estos algoritmos eficientes se de manera colectiva se le conoce como transformada rápida de Fourier FFT, *Fast Fourier Transform*. Para conseguir la máxima eficiencia los algoritmos FFT deben calcular los N valores de la DFT.

Los algoritmos de FFT se fundamentan en el principio fundamental de desarticular el cálculo de una transformada discreta de Fourier que se encuentra en una secuencia de longitud N que está en una transformada discreta de Fourier más pequeña. Las transformadas de menor longitud se pueden evaluar por métodos directos o descomponerse a su vez en transformadas más pequeñas.

La manera en la que se aplica dicho principio se dirige a una diversidad de algoritmos muy distintos entre sí, cada uno de ellos comparables para la mejora de la velocidad de cómputo.

1.11.1. Algoritmos de FFT mediante diezmado en el tiempo

Se consideran dos clases básicas de algoritmos de FFT, la primera, denominada diezmado en el tiempo. Recibe su nombre del hecho de que, durante el proceso de estructurar los cálculos en transformaciones más pequeñas, la secuencia $x[n]$, que se considera una secuencia temporal, hay una secuencia temporal que se descompone en subsecuencias cada vez más pequeñas. Los algoritmos de FFT se fundamentan, por medio del diezmado en el tiempo, en la estructura de los cálculos de la DFT, dividiendo la secuencia de entrada $x[n]$ en secciones más pequeñas.

1.11.2. Algoritmos de FFT mediante diezmado en frecuencia

En la segunda clase general de algoritmos la secuencia de los coeficientes de la transformada discreta de Fourier $X[k]$, se divide en subsecuencias más pequeñas. De ahí su nombre de diezmado en frecuencia.

1.12. Procesado digital de señales analógicas

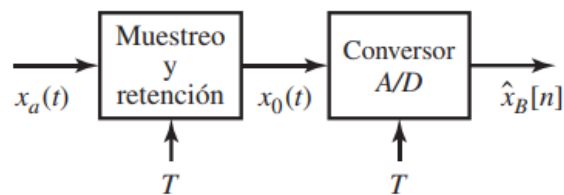
En términos prácticos, las señales en tiempo continuo no son precisamente de banda limitada, los filtros ideales no se pueden realizar y los conversores ideales C/D y D/C solo se pueden aproximar mediante dispositivos que se denominan conversores analógico-digital A/D y digital-analógico D/A.

1.12.1. Conversión A/D

Un conversor A/D ideal convierte una señal en tiempo continuo en una señal en tiempo discreto. Cada muestra se conoce con precisión infinita. Por ello, convierte una señal en tiempo continuo, analógica, en una señal digital, es decir, una secuencia de muestras de precisión finita o cuantificadas.

El conversor A/D es un dispositivo físico que convierte una amplitud de tensión o corriente a su entrada en un código binario, que representa la amplitud cuantificada más cercana a la amplitud de la entrada. Bajo el control de un reloj externo, el conversor A/D puede iniciar y completar una conversión A/D cada T segundos. Sin embargo, la conversión no es instantánea y por este motivo los sistemas A/D de altas prestaciones incluyen un sistema de muestreo y retención.

Figura 6. Configuración física de la conversión A/D



Fuente: OPPENHEIM, Alan. SCHAFER, Ronald. *Tratamiento De Señales En Tiempo Discreto Tercera Edición.* p 206.

1.13. Radio definida por software

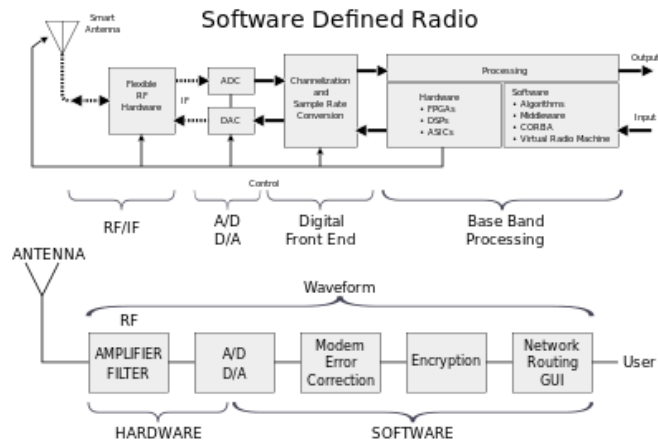
La radio definida por software o SDR por sus siglas en inglés *Software Defined Radio* es un sistema de radiocomunicaciones en el que muchos de los componentes que se implementan frecuentemente en hardware, tales como los

mezcladores, filtros, moduladores/demoduladores, detectores, entre otros. Estos son implementados en software. Es necesario un ordenador personal u cualquier otro tipo de aparato de cómputo. A pesar de que el concepto de SDR no es actual, la evolución de la circuitería digital ha facilitado muchos aspectos, tales como el punto de vista práctico, algunos procesos que antes se habían planteado únicamente de manera teórica.

La composición de un aparato SDR básico bien puede estar integrado por un ordenador que esté equipado con la tarjeta de sonido o cualquier conversor analógico-digital, el cual debe estar antecedido por un adaptador de radiofrecuencia RF. La mayor parte del procesamiento de las señales se lleva a cabo en los procesadores de propósito general, en vez de usar un hardware de propósito específico. Este tipo de configuración da el permiso para cambiar los protocolos y las formas de onda con la facilidad de cambiar el software.

La SDR sirve tanto para los servicios de telefonía celular como para el ámbito militar, ya que en ambos usos se manejan con varios protocolos que son en tiempo real, pues, cambian con recurrencia de acuerdo con la necesidad. La ventaja que tiene la SDR es que, en un mismo dispositivo, que sea programable, se puedan realizar las tareas que se hacen en un transceptor de radio, aparato de bluetooth o en cualquier dispositivo que sea para ondas radioeléctricas.

Figura 7. **Concepto de radio definida por software**



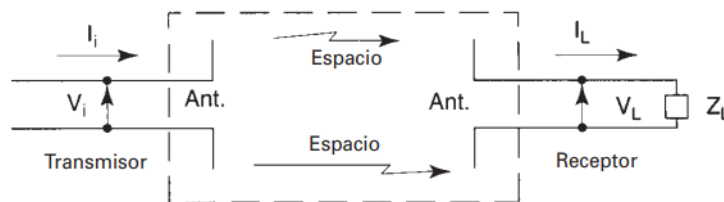
Fuente: Consultado el 10 de febrero de 2022. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_definida_por_software.

1.14. Antenas

Las antenas se componen de un sistema conductor metálico capaz de radiar y capturar ondas electromagnéticas. Estas son para conectar las líneas de transmisión con el espacio libre, el cual se conecta a líneas de transmisión o ambas cosas. En otras palabras, una línea de transmisión reúne la energía de un transmisor o de un receptor con una antena que al mismo tiempo acopla la energía con la atmósfera terrestre, por consiguiente, la atmósfera terrestre a una línea de transmisión. El transmisor tiene un sistema de radiocomunicaciones con espacio libre, además de contener una antena que convierte la energía eléctrica, la cual viaja por una línea de transmisión, en ondas electromagnéticas. Mientras que en el extremo receptor la antena convierte las ondas electromagnéticas en el espacio de la energía eléctrica de la línea de transmisión.

En el campo de las radiocomunicaciones, los transmisores se conectan a los receptores mediante líneas de transmisión, antenas y el espacio libre. En cuanto a las ondas electromagnéticas se reúnen desde las antenas transmisoras hasta las receptoras mediante el espacio libre en una manera similar a cuando la energía se acopla desde el primario hasta el secundario del transformador. Sin embargo, las antenas el grado de acoplamiento es menor que en un transformador e interviene una onda electromagnética y no solo una onda magnética. La representación de un sistema de acoplamiento con antena se puede ser con una red de cuatro terminales. En ese sentido, la energía electromagnética se transfiere desde la antena transmisora hasta un espacio libre para después ir desde el espacio libre a una antena receptora.

Figura 8. **Antena como red de cuatro terminales**



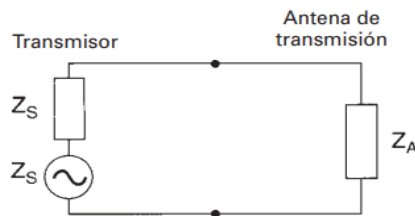
Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 373.

Una antena básica es un dispositivo recíproco pasivo, porque en realidad no puede amplificar una señal, por lo menos no en el sentido verdadero de la palabra. La antena se considera como un dispositivo por sus características y por el desempeño de transmisión, como por su recepción son idénticas, tales como la ganancia, la frecuencia de operación, la directividad, el ancho de banda, la resistencia de radiación, entre otras cuestiones.

1.14.1. Antena de transmisión

Las antenas de transmisión deben saber manejar las potencias grandes y, en consecuencia, ya que deben estar constituidos por materiales que soporten altos voltajes y grandes potencias, como el tubo metálico.

Figura 9. Circuito equivalente a una antena de transmisión

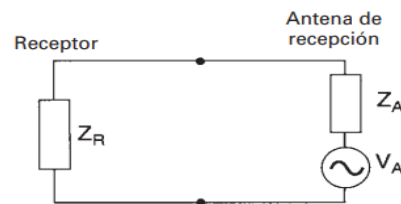


Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 373.

1.14.2. Antena de recepción

Las antenas de recepción son las que producen voltajes y corrientes pequeños, ya que estas se hacen con alambre de diámetro pequeño. Sin embargo, en algunos sistemas de radio comunicación se utiliza la misma antena tanto para transmitir como recibir. En cambio, las antenas normales no contienen componentes activos como diodos, transistores, FET, entre otros, por tanto, son pasivas y recíprocas. En la práctica, una antena activa no existe.

Figura 10. **Circuito equivalente a una antena de recepción**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 373.

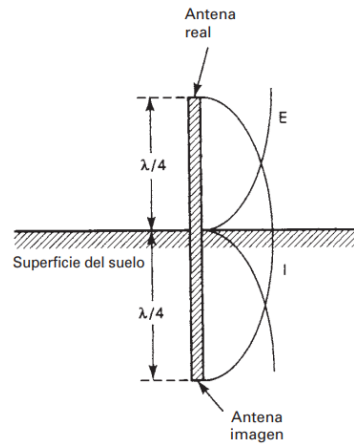
1.14.3. Antena monopolo

Una antena monopolo, de un solo polo, se llama antena Marconi, ya que es de un cuarto de longitud de onda de largo. Este tipo de antena se monta en dirección vertical que se conecta por medio del extremo inferior, el cual está directamente al suelo mediante una red de acoplamiento de dicha antena.

Las características de esta antena se parecen a las de la antena de hercio, a causa de las ondas reflejadas en el suelo. Se observa que, si se monta la antena de Marconi en forma directa sobre la superficie terrestre, se combinan la antena real y su imagen, y producen exactamente las mismas distribuciones de ondas estacionarias que las de una antena de media onda no aterrizada de hercio.

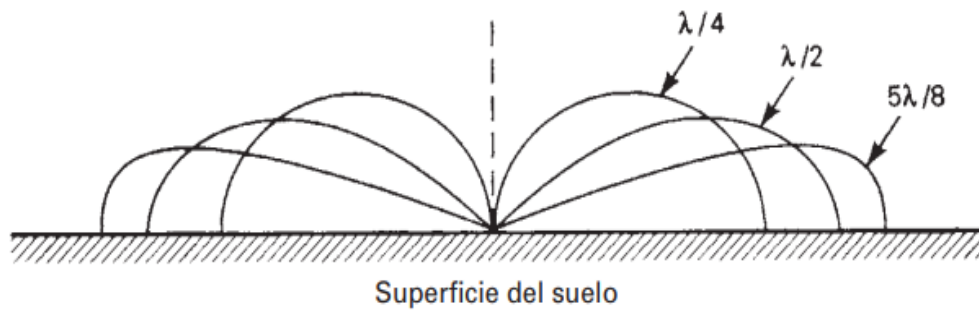
Los máximos de corriente se presentan en los extremos aterrizados y eso hace que pase una gran corriente por el suelo. Para reducir las pérdidas, el terreno debe ser buen conductor, por ejemplo, como un suelo rico en arcilla. Si es mal conductor, por ejemplo, si es arenoso o rocoso, se podrá necesitar un sistema de plano de tierra, artificial, hecho con alambres gruesos de cobre repartidos radialmente abajo de la antena.

Figura 11. **Antena aterrizada de cuarto de onda: ondas estacionarias de voltaje y de corriente**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 389.

Figura 12. **Antena aterrizada de cuarto de onda: distribución de la radiación**



Fuente: TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Cuarta Edición*. p 389.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Hardware

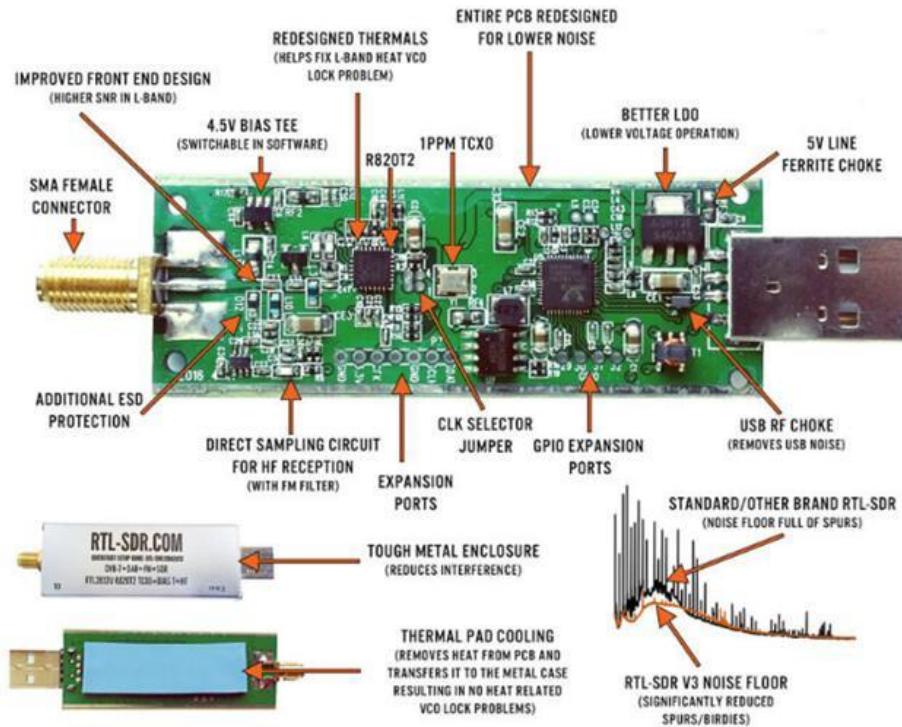
De acuerdo con Lázaro (2019), el hardware se compone de las piezas físicas que tienen relación entre sí, ya sea de manera analógica o digital, para el funcionamiento de la computadora. En otras palabras, el hardware es el soporte tangible de una computadora sobre el cual se instala y opera el software.

2.1.1. NooElec NESDR USB Receive

Está compuesto por el microchip RTL2832U cuya función es actuar como demodulador de la señal recibida, muestreador e interfaz USB para conexión al ordenador. Además, todo RTL2832 viene acompañado de un tuner o sintonizador; el R820T de Rafael Micro selecciona la frecuencia de trabajo del receptor entre 25 hasta 1,750 MHz y que, por tanto, ofrece un amplio rango de frecuencias para trabajar.

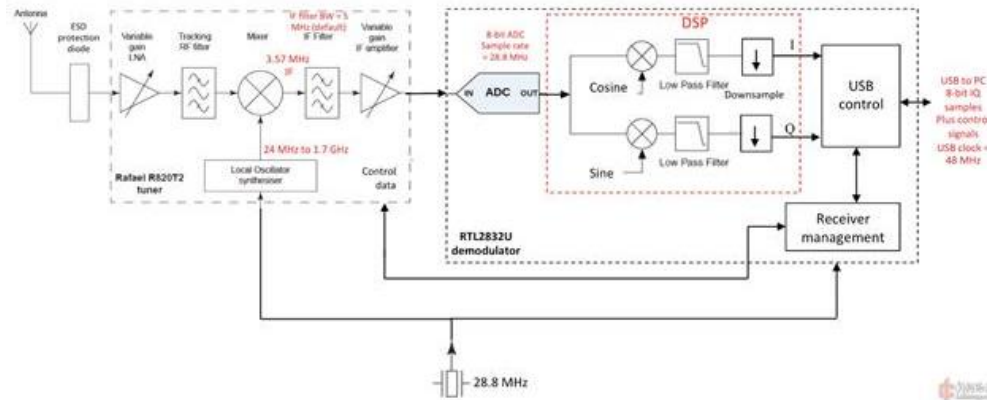
El tipo de conector que incorpora es un MCX hembra, que permite conectar mediante un cable. El USB con una antena telescópica viene protegido por una carcasa de aluminio de alta calidad que protege de las influencias electromagnéticas que se generan alrededor del PC, por lo que garantiza una mejor sensibilidad a la hora de trabajar con aplicaciones SDR.

Figura 13. Esquema RTL-SDR general



Fuente: Consultado el 15 de febrero de 2022. Recuperado de <https://images4.programmerclick.com/833/3b/3b834c92764c54eb0276d54aaf553689.png>.

Figura 14. Diagrama de bloques RTL-SDR



Fuente: Consultado el 15 de febrero de 2022. Recuperado de <https://images3.programmerclick.com/737/f0/f035bbf0ec4670a63a331a03df5beb79.png>.

Figura 15. NooElec NESDR USB RTL-SDR



Fuente: Consultado el 15 de febrero de 2022. Recuperado de <https://images.app.goo.gl/C5VDaNmSRDFPqbsF8>.

2.1.1.1. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del hardware utilizado se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla I. **Especificaciones técnicas NooElec SDR USB**

Especificación	Descripción
Protección	EMI.
Consumo de energía	Se ha reducido en un promedio de 10 mA, lo que significa que se genera menos calor en comparación con otros diseños.
Base de antena	Cable RG58 de 2 m.
Antena	Telescópico mástil de frecuencia variable.
Demodulador	RTL2832U / IC de interfaz USB
Sintonizador	IC R820T2
Entrada de antena	SMA hembra
Carcasa	De aluminio cepillado negro de alta calidad.
Resolución	8 bits.
Canales	Únicamente con canal Rx.
Ancho de banda	1 MHz a 3 MHz.
Rango de frecuencia	25 MHz a 1,750 MHz.

Fuente: Consultado el 15 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nesdr/nesdr-smartee.html>.

2.1.1.2. Sintonizador R820T2

El sintonizador de silicio digital R820T2 se deriva de la arquitectura más avanzada de Rafael Micro, lo que permite el menor consumo de energía y el factor de fuente más pequeño, por lo que proporciona un rendimiento de RF inigualable. Tiene un excelente rendimiento en términos de sensibilidad, linealidad, inmunidad del canal adyacente y rechazo de imágenes. El chip está integrado con un detector de potencia inteligente para optimizar diferentes condiciones de potencia de entrada y un rango dinámico libre de espurias.

Altamente integrado con amplificador de bajo ruido LNA incorporado, mezclador, PLL fraccional, VGA, regulador de voltaje y filtro de seguimiento.

2.1.1.3. Demodulador RTL2832U

Es un demodulador de alto rendimiento que admite la interfaz USB 2.0., detección automática de parámetros de modulación, como velocidad de código e intervalo de guarda. Es compatible con IF frecuencia intermedia, 36.125MHz, baja frecuencia intermedia 4.57MHz o un sintonizador que utiliza una salida de cristal de cero IF de 28.8MHz. Asimismo, incluye soporte de radio FM, ya que tiene un ADC avanzado incorporado, que tiene una alta estabilidad en la recepción portátil.

El RTL2832U más avanzado utiliza el algoritmo patentado de Realtek, que incluye una excelente estimación de canales, supresión de interfaz co-canal, recepción de canales de eco largos y cancelación de ruido de impulso. Proporciona soluciones ideales para varios algoritmos, así mismo, aplicaciones de PC – TV, como dongle USB y MiniCard / USB y sistemas integrados a través de la interfaz USB.

2.1.1.4. Instalación en sistema operativo

De acuerdo con Bellido (2013), la instalación del sistema operativo necesita de requisitos recomendables, en cuanto al hardware se refiere. Cada sistema operativo consta de características que requieren de especificaciones físicas para conseguir un desempeño óptimo.

En ese sentido, Bellido (2013) menciona que al instalar un sistema operativo se requiere del programa de instalación del mismo. Esta manera necesita de

configurarlo desde la Bios de la computadora. Sin embargo, existen otras maneras de hacerlo, las cuales también dependen del tipo de sistema operativo que se desee instalar.

2.1.1.4.1. Windows

El paquete de drivers es compatible con las versiones de Windows: XP, 7, 8 y 10, para 32-bit y 64-bit respectivamente. Para llevar a cabo a una instalación de forma correcta del equipo se deben seguir los siguientes pasos:

- Descargar el paquete de drivers del enlace:
https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/56/product/0/nedr_driver_installer_for_windows.exe
- Conectar el hardware NooElec NESDR a un puerto USB 2.0 disponible.

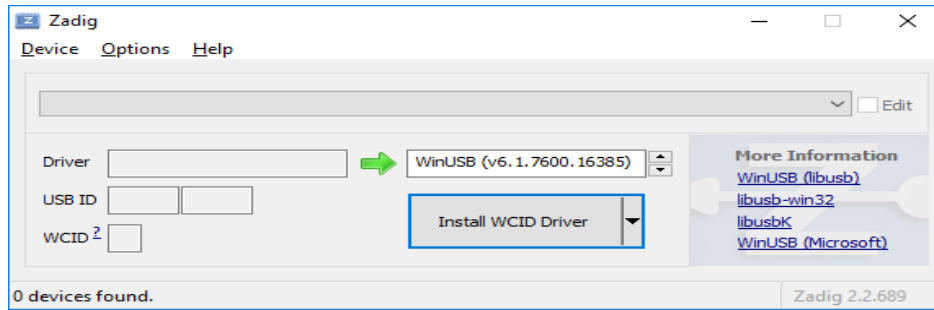
Figura 16. **NooElec NESDR**



Fuente: Consultado el 19 de febrero de 2022. Recuperado de
https://www.nooelec.com/store/media/catalog/product/cache/1/small_image/295x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/1/0/100701_1_1.png.

- Abrir el Instalador de controladores NESDR, el nombre del instalador es Zadig.

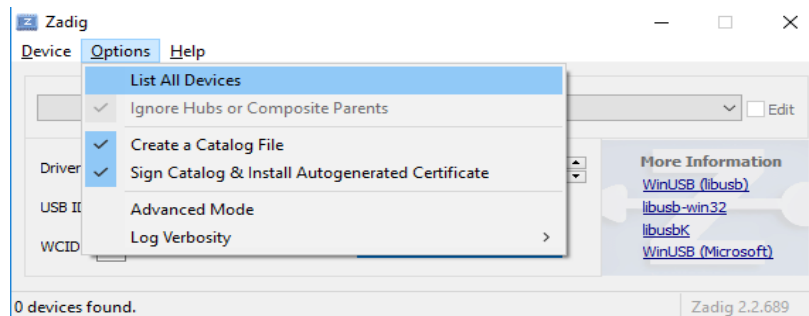
Figura 17. **Ventana de instalador Zadig**



Fuente: Consultado el 19 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/qs/>.

- Seleccionar Listar todos los dispositivos, lista *all devices*, del menú opciones, *options*, en la ventana de *Zadig*.

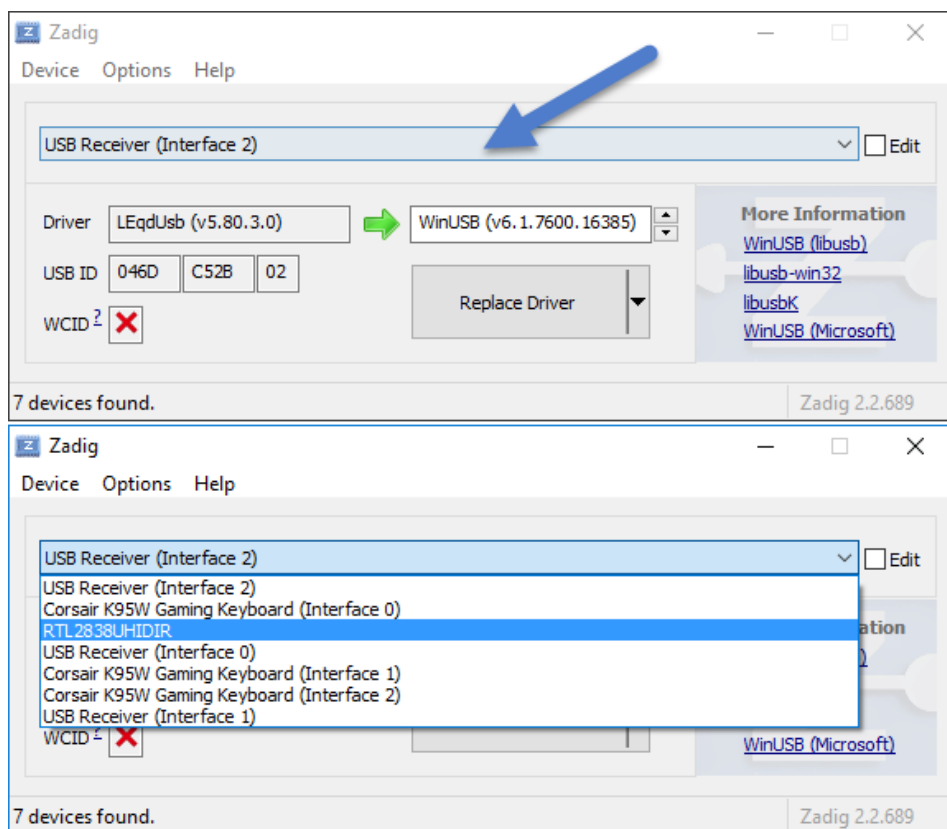
Figura 18. **Listar todos los dispositivos del menú opciones**



Fuente: Consultado el 19 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/qs/>.

- Desde el menú desplegable principal, seleccionar la NESDR RTL2832U. El nombre del dispositivo puede variar dependiendo del sistema operativo en uso.

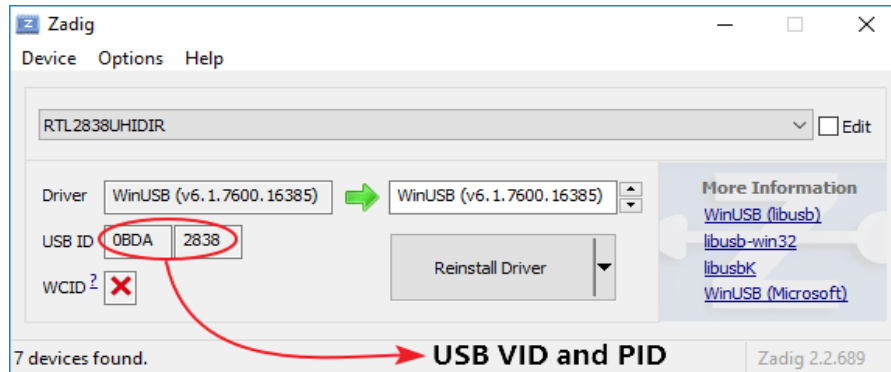
Figura 19. **Búsqueda de dispositivo por nombre RTL2832U**



Fuente: Consultado el 20 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/qs/>.

- Se debe confirmar que el dispositivo seleccionado tiene una identificación USB de 0BDA 2838.

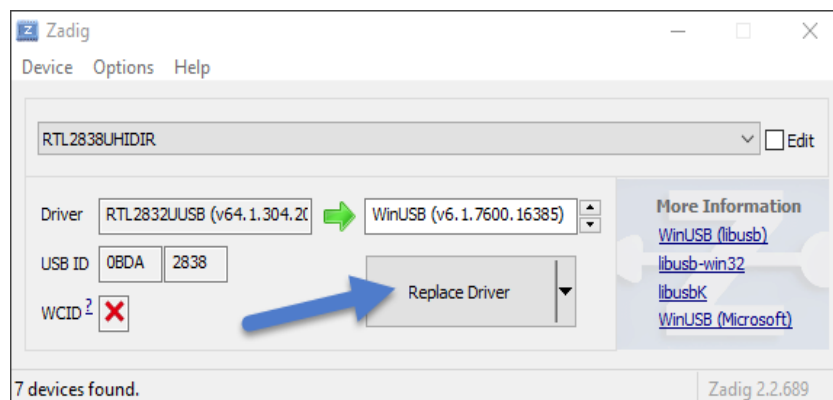
Figura 20. Identificación por USB ID



Fuente: Consultado el 20 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/qs/>.

- Presionar el botón grande para instalar los controladores. El botón dirá instalar controlador o reinstalar controlador, según el entorno y la configuración de Windows, cualquiera que se escoja es correcto.

Figura 21. Instalación de controlador



Fuente: Consultado el 20 de febrero de 2022. Recuperado de <https://www.nooelec.com/store/qs/>.

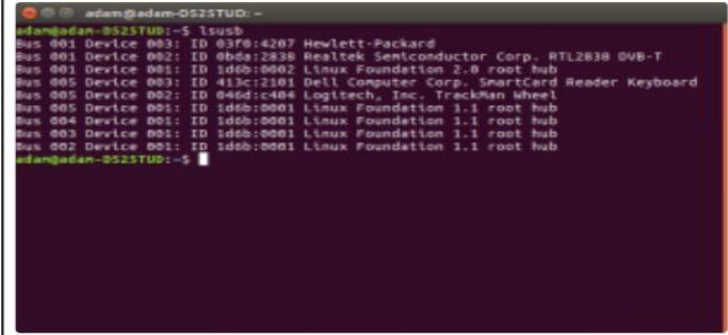
- Al seguir todos los pasos anteriores, los controladores estarán instalados de forma correcta.

2.1.1.4.2. Linux

El hardware NooElec NESDR es totalmente compatible con todas las distribuciones de Linux conocidas. Sin embargo, debido a la amplia variedad de distribuciones disponibles, los procedimientos de instalación pueden variar. El caso que se verá es con la distribución de Ubuntu.

- En la terminal ejecutar el comando `lsusb` debe mostrar una lista de dispositivos disponibles y conectados, tiene que aparecer el Realtek Semiconductor Corp. RTL2832 DVB-T. Si no aparece, cambiar a otro puerto USB.

Figura 22. Lista de dispositivos por medio de comando `lsusb`



```
adam@adam-Q525TU0: ~$ lsusb
Bus 001 Device 003: ID 03f0:4207 Hewlett-Packard
Bus 001 Device 002: ID 0bda:2838 Realtek Semiconductor Corp. RTL2832 DVB-T
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
Bus 005 Device 003: ID 413c:2101 Dell Computer Corp. SmartCard Reader Keyboard
Bus 005 Device 002: ID 046d:c404 Logitech, Inc. TrackMan Wheel
Bus 005 Device 001: ID 1d6b:0001 Linux Foundation 1.1 root hub
Bus 004 Device 001: ID 1d6b:0001 Linux Foundation 1.1 root hub
Bus 003 Device 001: ID 1d6b:0001 Linux Foundation 1.1 root hub
Bus 002 Device 001: ID 1d6b:0001 Linux Foundation 1.1 root hub
adam@adam-Q525TU0: ~$
```

LSUSB SHOWS THAT THE DONGLE IS SEEN

Fuente: Consultado el 21 de febrero de 2022. Recuperado de https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/72/product/0/nedr_installation_manual_for_ubuntu.pdf.

- Si ejecuta el comando `lsmod | grep dvb`, este debe mostrar los drivers que trae por defecto el SDR.

Figura 23. Lista de drivers

```

adam@adam-0525TUD: ~
adam@adam-0525TUD:~$ lsmod | grep dvb
dvb_usb_rtl28xxu      36864  1
dvb_usb_v2          32768  1 dvb_usb_rtl28xxu
dvb_core            106496  2 dvb_usb_v2,rtl2832
rc_core              28672  5 lr_llrc_codec,llrc_dev,dvb_usb_v2,dvb_usb_rtl28xxu
adam@adam-0525TUD:~$

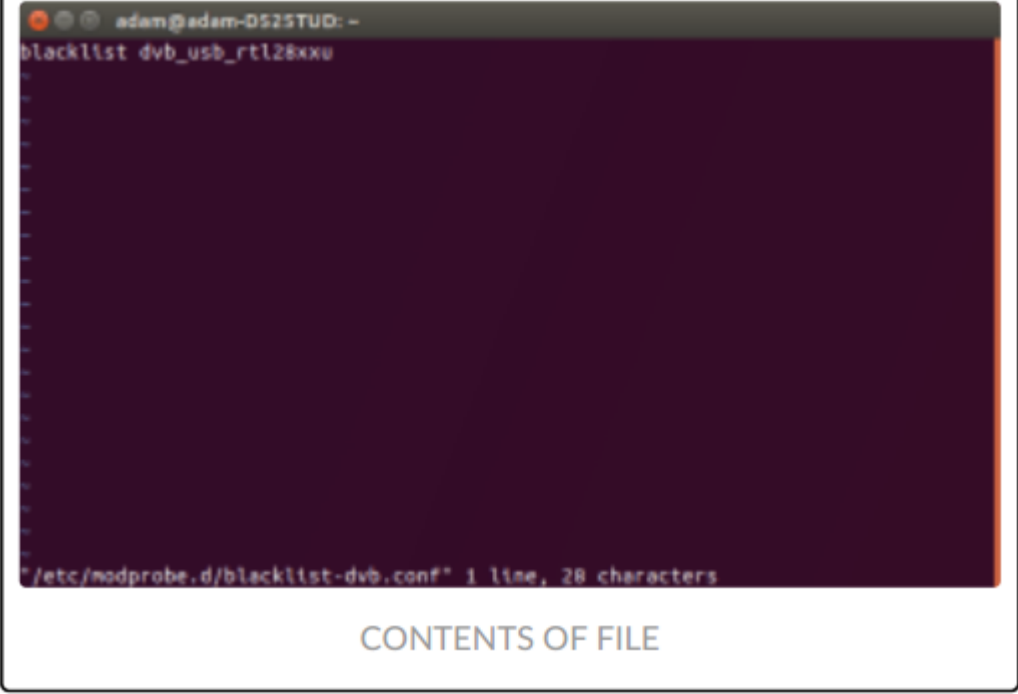
```

LSMOD SHOWS THAT THE DVB DRIVER IS INSTALLED AND LOADED

Fuente: Consultado el 22 de febrero de 2022. Recuperado de https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/72/product/0/nedr_installation_manual_for_ubuntu.pdf.

- Para remover los drivers y darle uso exclusivo de SDR a nuestro módulo. Se debe ejecutar el comando `sudo vi /etc/modprobe.d/blacklist-dvb.conf`; esto creará un archivo en blanco para editar. Se colocará una lista negra, la cual desactivará el controlador de dvb. Se debe colocar la línea `blacklist dvb_usb_rtl28xxu`, guardar y cerrar.

Figura 24. **Agregado de lista negra**

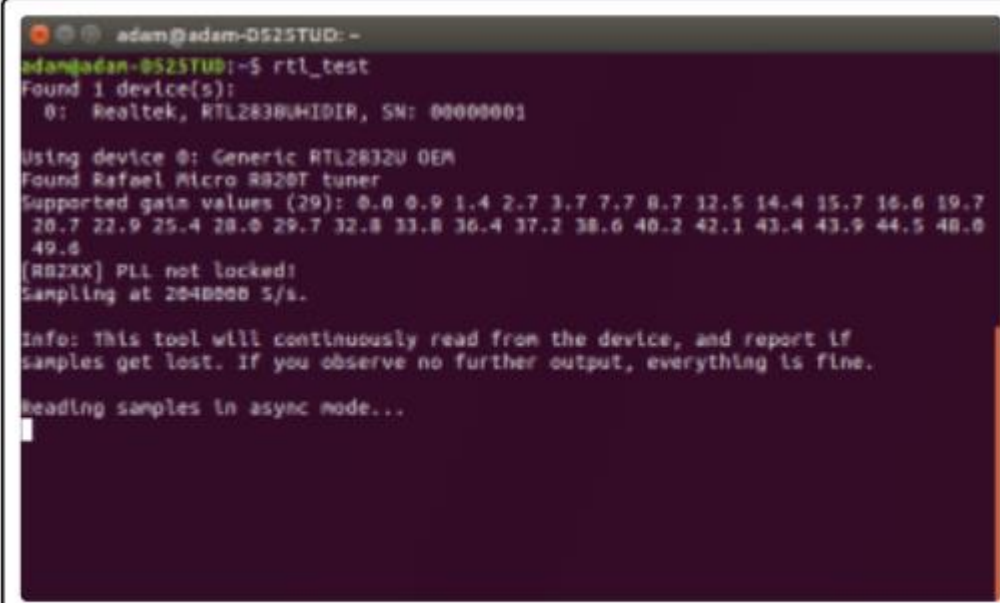


```
adam@adam-DS25TUD: ~$ blacklist dvb_usb_rtl28xxu
/etc/modprobe.d/blacklist-dvb.conf 1 line, 28 characters
CONTENTS OF FILE
```

Fuente: Consultado el 22 de febrero de 2022. Recuperado de https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/72/product/0/nedr_installation_manual_for_ubuntu.pdf.

- Reiniciar el sistema operativo.
- Instalar los drivers para RTL-SDR con `sudo apt-get install rtl-sdr`.
- Por último, para comprobar que el NESDR funcione, se debe hacer un testeo de recepción, por tanto, hay que ejecutar `rtl_test`. Aparecerá el dispositivo y la recepción de datos.

Figura 25. Ejecución de comando rtl_test



```
adam@adam-DS25TUD: ~$ rtl_test
Found 1 device(s):
 0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Rafael Micro R820T tuner
Supported gain values (29): 0.0 0.9 1.4 2.7 3.7 7.7 8.7 12.5 14.4 15.7 16.6 19.7
20.7 22.9 25.4 28.0 29.7 32.8 33.8 36.4 37.2 38.6 40.2 42.1 43.4 43.9 44.5 48.0
49.6
[RR2XX] PLL not locked!
Sampling at 2048000 S/s.

Info: This tool will continuously read from the device, and report if
samples get lost. If you observe no further output, everything is fine.

heading samples in async mode...
```

RESULTS OF RTL-TEST. YOU WANT IT TO STOP HERE
AND NOT PRINT ANY MORE LINES.

Fuente: Consultado el 22 de febrero de 2022. Recuperado de https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/72/product/0/nesdr_installation_manual_for_ubuntu.pdf.

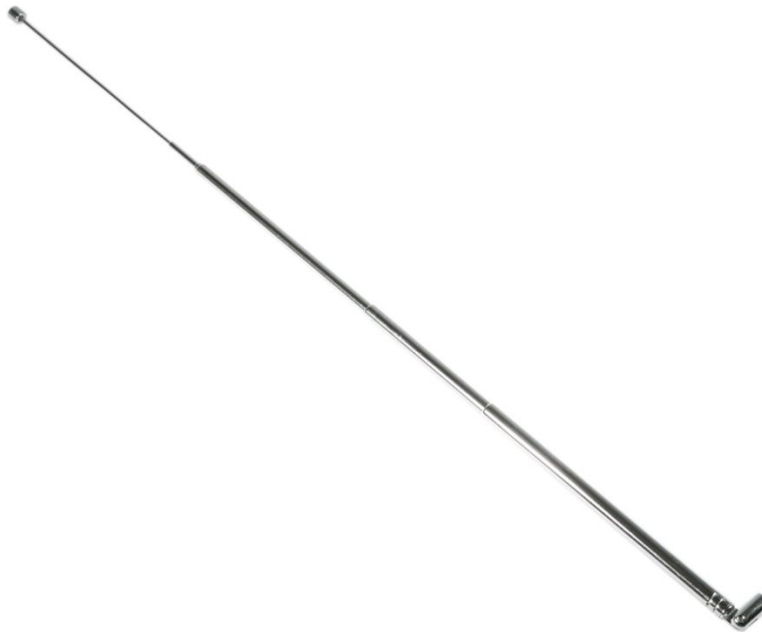
2.1.1.5. Antena monopolo telescópica

Una antena telescópica es aquella que se construye a partir de un alambre o varilla flexible recta. El extremo inferior está conectado radio receptor o transmisor, por tanto, esta antena se designa a ser flexible para evitar que se rompa con facilidad. Su nombre proviene del movimiento que obtiene cuando se le manipula, el cual es bastante parecido al de un látigo. Las antenas telescópicas, o también denominadas de látigo para radios portátiles, son, en su

mayoría, una serie de tubos de metal telescópicos entrelazados, a tal punto que llegan a ser retraídos cuando no están en uso.

La extensión de la antena se determina mediante la frecuencia de las ondas de radio con que será utilizada. En ese sentido, lo más común es el uso del tipo de látigo cuarto de onda, el cual cuenta con una aproximación de un cuarto de longitud. Por ello, se considera uno de los tipos más comunes de antena monopolo, por tanto, se utiliza en las bandas HF, VHF y UHF. El uso más recurrente que tienen es para las radios portátiles, teléfonos inalámbricos, entre otros, ya que también son antenas en unidades de cabera y transceptores de vehículos.

Figura 26. **Antena de látigo o telescópica**



Fuente: Consultado el 4 de marzo de 2022. Recuperado de https://www.nooelec.com/store/media/catalog/product/cache/1/image/1200x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/n/e/nesdr_smart_antenna_6.png.

2.1.1.6. Conector MCX

Los conectores MCX machos y hembras son conectores RF con cierre de botón. Este tipo de conector se usa para las frecuencias de 6 GHz, ya que cuenta con una impedancia que se caracteriza por los 50 ohmios. Por ello, este tipo de conector también se usan por el tamaño para dispositivos de medición.

Figura 27. Conector MCX macho y hembra respectivamente



Fuente: Consultado el 4 de marzo de 2022. Recuperado de <https://andromedanautica.com/wp-content/uploads/2019/12/conector-mcx.jpg>.

2.2. Software

De acuerdo con Sánchez (2013), el software es la parte lógica del equipo, este se compone de diversos conjuntos de componentes lógicos que son importantes para realizar tareas específicas. Asimismo, los componentes lógicos se componen de los programas informáticos, por ejemplo, el procesador de texto.

Sin embargo, Sánchez (2013) considera que el concepto es más profundo que la reducción al conjunto de programas, ya que no se toma en cuenta el código fuente, ejecutable o binario, los datos procesados, hasta la información del usuario cuando hace uso del software.

2.2.1. GNU Radio Companion

GNU Radio Companion se considera como una herramienta, que es de desarrollo libre y abierta, con la facilidad de proveer bloques de procesamiento de señal, la cual diseña sistemas de radio definida por el software. Asimismo, esta se utiliza como hardware de RF, que son de bajo costo, para la creación de radios definidas por software, las cuales estarían en un ambiente de simulación. En ese sentido, también se usa para ambientes de aficionados o académicos, así como comerciales, para brindar soporte a la investigación correspondiente a comunicaciones inalámbricas y de sistemas de radio.

Las aplicaciones de GNU Radio se crean por medio de un entorno gráfico GNU Radio Companion o también a través del lenguaje de programación Python; mientras que hay una parte que necesita de alto rendimiento, por lo que se utiliza en lenguaje C++. El desarrollador debe poder crear sistemas de radio en tiempo real y de alto rendimiento por medio del uso simple y rápido del entorno de desarrollo de aplicaciones.

Asimismo, soporta el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señal utilizando los datos generados en ese momento, por lo que evita la necesidad del uso de un hardware real. Se considera como un paquete de procesamiento de señales que está bajo la distribución de la licencia GNU GPL. En general, el código contiene los derechos de autor de *Free Software Fundación*. Por ello, es ventajoso ya que consiste en dar un software que sea accesible para desarrollar la habilidad en un nivel técnico, así como la profundidad el espectro electromagnético. En otras palabras, sirve para comprender el espectro de radio y conocer cómo se usa.

Así como la totalidad de los sistemas de radio definidos por software, la configuración de este se convierte en una característica clave. Otra característica relevante es que puede ser adquirido como una simple radio genérica, la cual usa un procesamiento de señal por software. En la actualidad solo unas formas de radio son procesables en GNU Radio, pero sí se reconoce la matemática del sistema de transmisión de radio, ya que se reconfigura GNU Radio para ser recibida.

Figura 28. **GNU Radio-Companion**



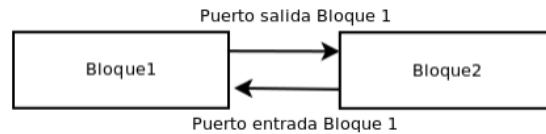
Fuente: Consultado el 5 de marzo de 2022. Recuperado de <https://www.gnuradio.org/doc/doxygen-3.7.4/gnuradio-logo.svg>.

2.2.1.1. Concepto de bloque

Se basa en la teoría de los grafos donde los vértices son bloques de procesamiento de datos y las uniones entre ellos representan el flujo de información entre los mismos. Los bloques de procesamiento de señales vienen implementados en el lenguaje C++, la llamada a los bloques se realiza en Python.

Python es un lenguaje de programación interpretado que no necesita compilación, por tanto, agiliza el desarrollo, ya que no se preocupa de la implementación de los bloques. Enlaza un bloque con otro encaminando el flujo de datos hasta la salida lo que pasa dentro del bloque es transparente para él.

Figura 29. **Esquema de bloques utilizado por GNU Radio**



Fuente: elaboración propia, realizado con Paint 3D.

Los atributos que definen un bloque son número de puerto de entrada, número de puerto de salida y el tipo de datos de entrada y salida que manejan. No todos los bloques tienen porque tener definidos todos los atributos. Hay bloques de solo entrada o solo salida. GNU Radio incluye más de 100 bloques predefinidos en su librería.

2.2.1.2. Interfaz

La interfaz de GNU Radio no es muy diferente de otras aplicaciones vistas en sistemas operativos Windows o Linux, a continuación, se detallan los aspectos más importantes de este.

- Barra de herramientas: es la que presenta distintas opciones e instrumentos que se usan para el desarrollo de aplicaciones.

Figura 30. **Barra de herramientas interfaz GNU Radio Windows**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Error de diagrama de flujo: muestra notificaciones en donde se encuentra el error en los bloques.

Figura 31. **Icono de error de diagrama de flujo**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Generar diagrama de flujo: permite generar un archivo que será el encargado de la ejecución. Es equivalente a una compilación.

Figura 32. **Icono de generación de diagrama de flujo**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Run, correr: se encarga de la ejecución del programa una vez este no tenga errores.

Figura 33. **Icono de Run**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Deshabilitar y habilitar: desconecta y reconecta el bloque seleccionado en caso no se quiera utilizar dentro del diagrama de

flujo. Es más utilizado en pruebas y el bloque debe estar conectado en paralelo para no interferir en el flujo.

Figura 34. **Icono de habilitar y deshabilitar respectivamente**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Bypass: se utiliza para no eliminar el bloque que queremos no utilizar en el flujo. El bloque se tornará de color amarillo.

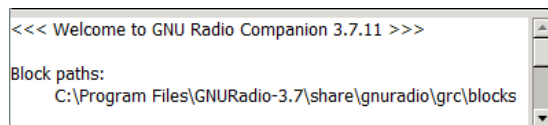
Figura 35. **Icono de Bypass**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Panel de consola: es el espacio en el que se observa detalladamente los mensajes que se envían a través del programa. También sirve como depurador cuando se revisan los mensajes de error al no funcionar, ya sea un programa o una aplicación.

Figura 36. **Panel de consola interfaz GNU Radio Windows**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Ventana de variables: es el espacio para observar las variables que la aplicación está utilizando y también permite la creación de nuevas, si esto es necesario.

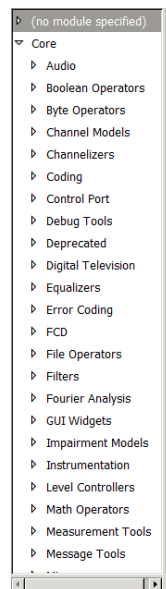
Figura 37. **Ventana de variables interfaz GNU Radio Windows**

Id	Value	
Imports		+
Variables		+
samp_rate	32000	×

Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

- Librería: también conocida como biblioteca, en este espacio se pueden hallar los bloques de herramientas que se presentan en GNU Radio.

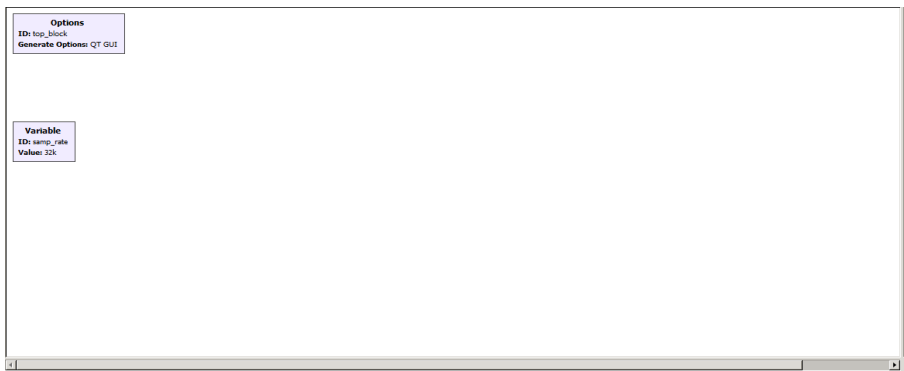
Figura 38. **Librería interfaz GNU Radio Windows**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

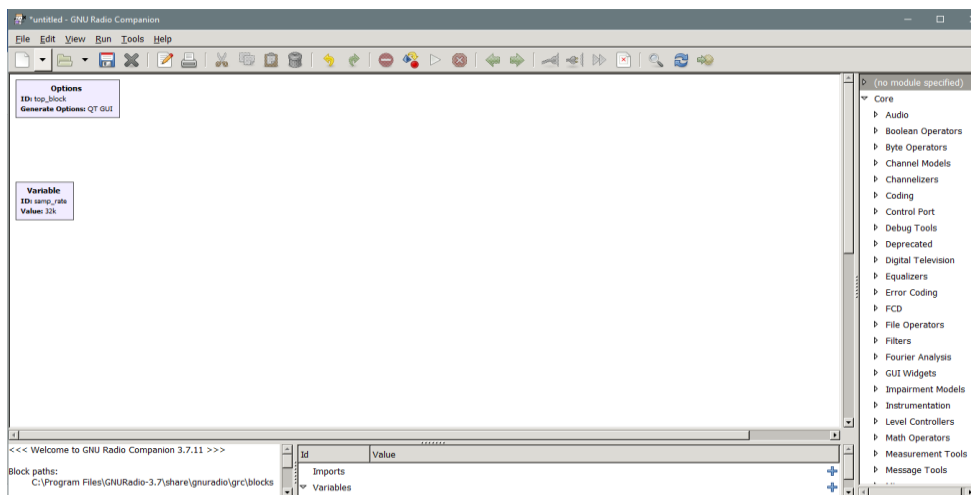
- Área de trabajo: esta área funciona para la conexión de los bloques, así como para el desarrollo de las aplicaciones. Por tanto, en el inicio, la aplicación debe aparecer en dos bloques en un mismo espacio de trabajo.

Figura 39. Área de trabajo interfaz GNU Radio Windows



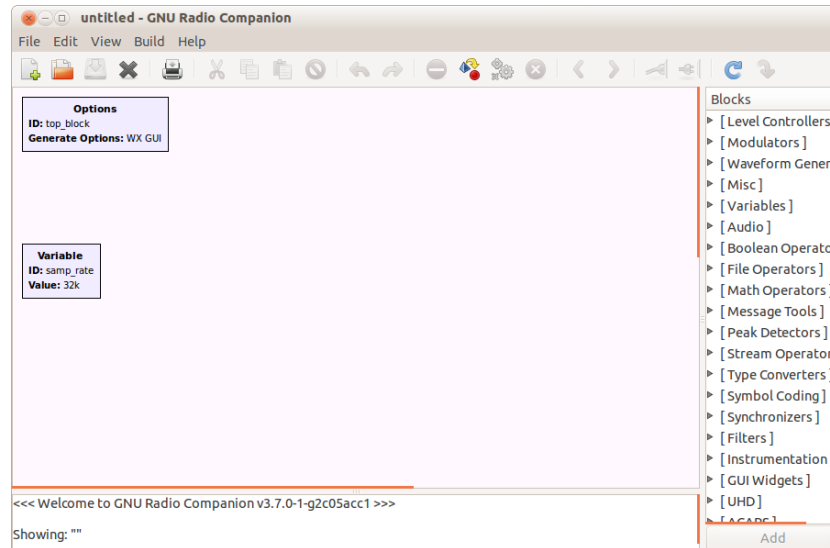
Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Figura 40. Interfaz general GNU Radio Windows



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Figura 41. Interfaz general GNU Radio Linux

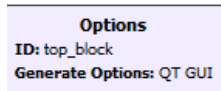


Fuente: https://www.ece.uvic.ca/~ece350/lab_manual/images/blank_flowgraph.png. Consulta: abril de 2021.

2.2.1.2.1. Bloque *Options*

El bloque Option es el que asigna el título a la aplicación, así mismo, escribir la descripción del qué hacer del autor. Este bloque también sirve para la asignación del tamaño del área que se utilizará. Permite la selección del tipo de opción que se pueden generar y usar en la aplicación. Para el desarrollo de las aplicaciones también está WX GUI y QT GUI.

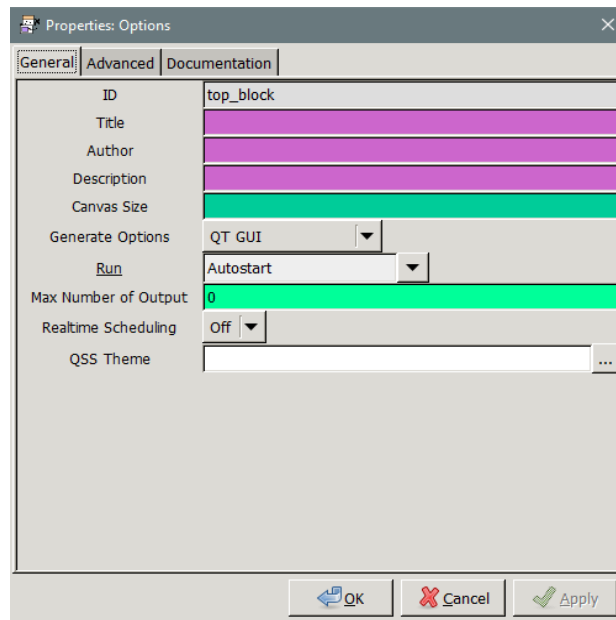
Figura 42. **Bloque *Options***



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Se observan diversas pestañas que explican la documentación y la descripción detallada del bloque, además, muestra algunos parámetros del código del bloque.

Figura 43. **Propiedades del bloque *Options***

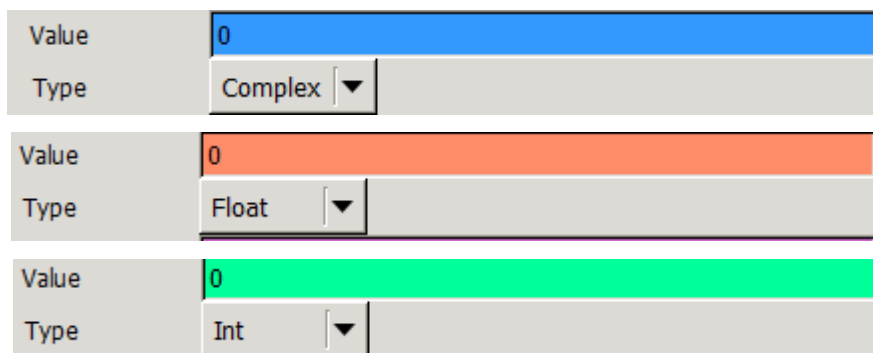


Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

2.2.1.2.2. Bloque variable

GNU Radio trabaja con diversos tipos de variables según los requerimientos del sistema o aplicación. Estos pueden ser enteros, flotantes, complejos, caracteres, bits, entre otros. Las variables se identifican con colores de entrada y salida en los bloques, incluso asignan el tipo de variables en las que el bloque trabajará.

Figura 44. Ejemplos de tipos de variable y color



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

2.2.1.2.3. Herramientas de análisis

En GNU Radio hay instrumentos que pueden hacer un análisis a las señales transmitidas y recibidas. Además, los bloques permiten la observación del comportamiento de las señales para la interpretación de los fenómenos que existen o se presentan en las aplicaciones o programas generados. Se dividen en dos grupos, los cuales son herramientas WX y QT, por lo que dependen de las variables que se usan.

- Herramientas WX GUI: se basan en lenguaje C++ para trabajar con WX *options*. Son incompatibles con herramientas QT GUI. Estas consumen más recursos en el procesamiento comparado con las herramientas QT GUI. Los bloques que se pueden encontrar son las siguientes:
 - WX GUI Scope Sink: observa el comportamiento de las señales en el dominio del tiempo. Funciona igual que un osciloscopio.
 - WX GUI FFT Sink: observa el dominio de la frecuencia de las señales, en otras palabras, al espectro de frecuencia de la o las señales que se analicen.
 - WX GUI Constellation Sink: representa gráficamente las señales complejas, por lo que sirve para el estudio y visualización de modulaciones digitales como: M-PSK, QAM, FSK, ASK, entre otros.
 - WX GUI Number Sink: es un instrumento que permite la entrega en tiempo real el valor numérico recibido transmitido de la señal, por lo que depende del tipo de variable usado, tales como real, compleja, entera.
 - WX GUI Waterfall Sink: observa el rango de frecuencia en que se transmite una señal. Esta herramienta hace un gráfico parecido a los mapas de calor.

- Herramientas QT GUI: este kit de herramientas que se basan en Python, por lo que consumen menos recursos en procesamiento. Además, ayudan en el desarrollo de más herramientas visuales por parte de los usuarios. Contiene más herramientas para la visualización de WX *Options*, algunas de ellas son las siguientes:

- QT GUI Constellation Sink: esta herramienta similar a WX Constellation sink, ya que permite la observación de las constelaciones de una señal modulada digitalmente.
- QT GUI Frequency Sink: similar a la WX FFT sink, por lo que permite variar el número de muestras de la FFT y observar con mayor o menor precisión la gráfica, por lo que implica un incremento o disminución en el procesamiento de la aplicación o programa.
- QT GUI Time Sink: es similar al WX Scope, ya que se puede ver el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo. Además, se agregan varias entradas de manera que se realiza una mejor comparación entre señales.
- QT GUI Waterfall Sink: el diagrama de cascada hace una gráfica similar a un mapa de calor, por lo que se muestran las frecuencias que tengan mayor concentración de potencia en el espectro de frecuencias.
- QT GUI Sink: observa las 4 herramientas en una sola ventana con diversas pestañas en la interfaz del usuario. El procesamiento disminuye ya que cada herramienta que no se usa se pausa mientras se utilice alguna.

2.2.1.2.4. Instalación en sistemas operativos Windows

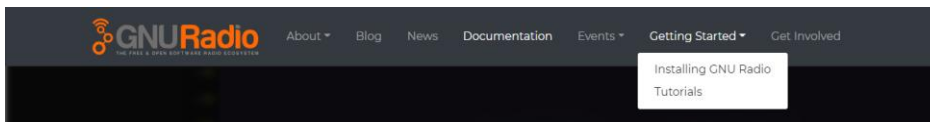
A pesar de que GNU Radio fue realizado para entornos Linux, este también cuenta con instaladores para Windows, los cuales son para distribuciones a 64 bits, los pasos para instalarlo son como cualquier otro programa:

- Ingresar a la página oficial de GNU Radio e ir a la parte de guía de instalación para elegir el paquete a instalar o ir directamente al siguiente

enlace:

http://www.gcnddevelopment.com/gnuradio/downloads/installers/v1.6.0/gnuradio_3.7.13.5_win64.msi

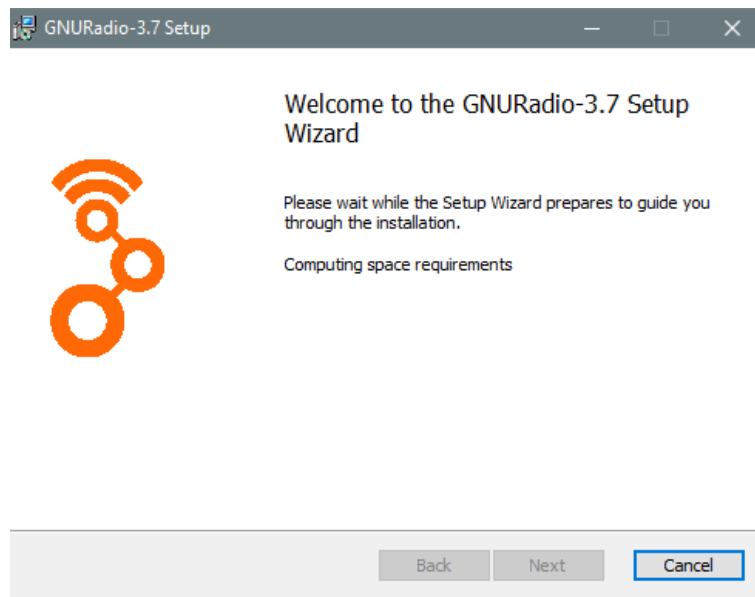
Figura 45. **Página oficial GNU Radio**



Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- La versión 3.7 es la más estable hasta el momento, ya que incluye una distribución de Python 2.7 y varios bloques ya incluidos.
- Una vez se haya descargado el instalador ejecutarlo `gnuradio_3.7.13.5_win64.msi`, y seguir las instrucciones de instalación.

Figura 46. **Instalador GNU Radio versión 3.7 para Windows**



Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Una vez terminada la instalación el programa ya estará listo para usarse. Es compatible con los sistemas operativos de Windows XP, 7, 8 y 10. Buscarlo en el menú de inicio como GNU Radio Companion.

2.2.1.2.5. Instalación en sistemas operativos Linux

Los pasos para instalar el paquete serán para las distribuciones Ubuntu / Debian, cabe resaltar que la instalación y funcionabilidad del programa es más estable en estas distribuciones.

- Descargar el repositorio del software por el siguiente comando en la terminal de la distribución a usarse.

Figura 47. Repositorio GNU Radio 3.9

```
$ sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases-3.9
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Actualización general por el comando.

Figura 48. Actualización de fuentes Apt

```
$ sudo apt-get update
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Instalar el programa.

Figura 49. **Instalación GNU Radio**

```
$ sudo apt install gnuradio
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Instalar una distribución de Python 2.7 o mayor.

Figura 50. **Instalación de Python en Linux**

```
$ sudo apt install python3-pip  
$ pip install packaging
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Por ahora el software GNU Radio está instalado, sin embargo, falta instalar los bloques que servirán para comunicarse con el SDR en uso. Para esto ejecutamos los siguientes comandos.

Figura 51. **Construyendo los repositorios Osmocom**

```
git clone git://git.osmocom.org/gr-osmosdr  
cd gr-osmosdr/  
  
mkdir build  
cd build/  
cmake ../
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Se enlistará un resumen de los componentes, revisar siempre que este las partes de RTL-SDR, que son las que nos servirán.

Figura 52. **Resumen de componentes**

```
-- #####  
-- # gr-osmosdr enabled components  
-- #####  
-- * Python support  
-- * Osmocom IQ Imbalance Correction  
-- * sysmocom OsmoSDR  
-- * FUNCube Dongle  
-- * FUNCube Dongle Pro+  
-- * IQ File Source  
-- * Osmocom RTLSDR  
-- * RTLSDR TCP Client  
-- * Ettus USRP Devices  
-- * Osmocom MiriSDR  
-- * HackRF Jawbreaker  
-- * nuand bladeRF  
-- * RFSPACE Receivers  
--  
-- #####  
-- # gr-osmosdr disabled components  
-- #####  
--  
-- Building for version: v0.1.0-4-g37aba331 / 0.1.1git  
-- Using install prefix: /usr/local
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Terminar con construir el repositorio e instalar.

Figura 53. **Instalación de Osmocom**

```
make  
sudo make install  
sudo ldconfig
```

Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

- Se tiene listo el software para realizar y utilizar las herramientas para el análisis de espectro por medio del SDR.

3. DISEÑO DE ANALIZADOR DE ESPECTRO

El diseño propuesto para realizar el analizador de espectro se centrará en describir el área de trabajo utilizada en el software de GNU Radio. Se le conoce como modo gráfico, también se estarán describiendo los bloques utilizados y las principales propiedades que se tienen que tomar en cuenta, así también describir la interfaz cuando se ejecute el programa.

3.1. Ejecución de GNU Radio en Windows 10

Para comenzar con el diseño ejecutaremos el programa GNU Radio Companion en el menú de inicio de Windows.

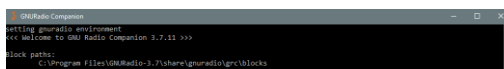
Figura 54. Icono GNU Radio en Windows 10



Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

Aparecerá una ventana de comandos con la ejecución del programa, esperar hasta que el programa se abra en una ventana.

Figura 55. Ventana de ejecución de GNU Radio



Fuente: elaboración propia, realizado con Herramienta Recortes.

3.2. Diseño de diagrama de flujo en GNU Radio

El diagrama de flujo indicara el orden de bloques que llevara el analizador de espectro, este también puede llevar bloques en paralelo para la representación de datos que se tenga. Se irán revisando los bloques conforme se vaya avanzando en el diseño. Para ingresar a estos parámetros y editarlos, se debe hacer doble clic en el bloque o clic derecho y seleccionar propiedades.

3.2.1. Configuración de bloque *Options*

Se configurarán los parámetros iniciales en este bloque a modo de demostración y ejemplo, al cambiar los parámetros siempre hacer clic en el botón aplicar y después clic en botón Ok.

Tabla II. Descripción y configuración de parámetros de bloque *Options*

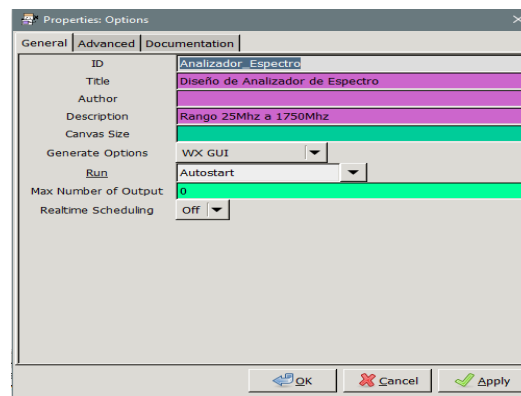
Parámetro	Descripción
ID	Identificador de bloque, es un nombre único asignado a cada bloque. En este se colocará el nombre <i>Analizador_Espectro</i> .
Title	Título del proyecto. Se colocará como <i>Diseño de Analizador de Espectro</i> .
Author	Nombre del autor del proyecto. Se dejará en blanco para este caso.
Description	Descripción del proyecto. Se colocará rango de 25 MHz a 1,750 MHz.
Canvas Size	Tamaño del área de trabajo. Se dejará por defecto como esta, se puede configurar como: ancho, alto.
Generate Options	Formato de salida del modo grafico cuando se genera el proyecto. Se utilizará el modo <i>WX GUI</i> para el entorno gráfico.
Run	Manera en la que arrancará el proyecto. Se deja en Automático, esto al momento de ejecutar el programa.
Max Number of Output	Máximo número de salidas. El Número máximo de salida es la cantidad máxima de elementos de salida permitidos para cualquier bloque en el diagrama de flujo; para deshabilitar esto, establezca <i>max_nouts</i> en 0. Usar esto para ajustar la latencia máxima que puede mostrar un diagrama de flujo. Para este caso se dejará en 0.

Continuación tabla II.

Realtime Scheduling	Activar o desactivar la programación en tiempo real, se debe tener configurado para activar esta opción. En este caso se dejará en Off.
QSS Theme	El tema gráfico del entorno. Únicamente se usa en el modo QT GUI.

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Configuración del bloque *Options***



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.2. Configuración de bloque Variable

Este bloque no se configurará para este diseño, por lo que se puede eliminar del área de trabajo.

3.2.3. Configuración de bloque WX GUI Slider

Este bloque crea una variable con un control deslizante. Se crearán tres bloques de este tipo para ganancia RF, rango de frecuencia y ancho de banda.

Tabla III. **Parámetros de bloque WX GUI Slider**

Parámetro	Descripción
ID	Identificador del bloque.
Label	Etiqueta de bloque, se deja en blanco para que variable ID quede como etiqueta.
Default Value	Valor por defecto que aparecerá cada vez que se ejecute el proyecto. Debe estar entre los valores máximo y mínimo.
Minimum	Valor mínimo configurable.
Maximum	Valor máximo configurable.
Num Steps	El número de pasos debe estar entre 0 y 1,000. Es la cantidad de pasos para llegar a los valores de mínimo y máximo.
Style	Puede ser horizontal o vertical.
Converter	Puede ser valor entero real o flotante.
Grid Position	Use la posición de cuadrícula en fila, columna, extensión de fila, extensión de columna para colocar el elemento gráfico en la ventana.
Notebook	Use Notebook Param en notebook-id y page-index para colocar el elemento gráfico dentro de una página de notebook.

Fuente: elaboración propia.

3.2.3.1. Configuración de Ganancia RF

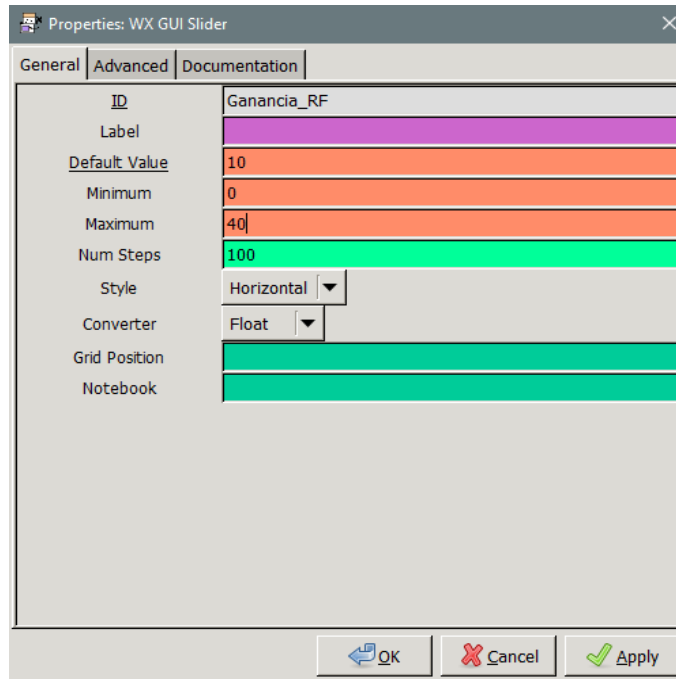
En este bloque se configurará la ganancia que tendrá el RTL-SDR para los efectos prácticos del diseño.

Tabla IV. **Configuración de ganancia RF**

Parámetro	Descripción
ID	Ganancia_RF
Label	Dejar en blanco
Default Value	10
Minimum	0
Maximum	40
Num Steps	100
Style	Horizontal
Converter	Float

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Configuración de ganancia RF



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.3.2. Configuración rango de frecuencia

En este bloque se configurará el rango de frecuencia alcanzable para el RTL-SDR, los cuales se vieron en las especificaciones técnicas.

Tabla V. Configuración de rango de frecuencia

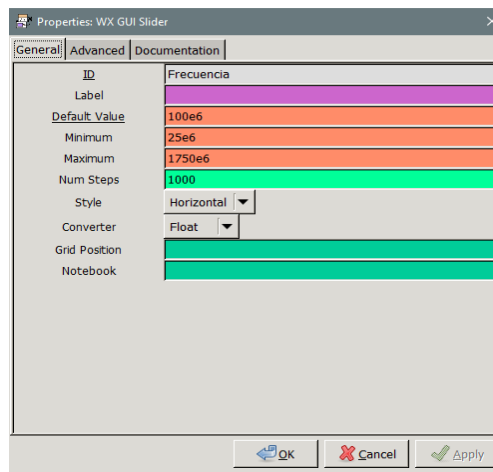
Parámetro	Descripción
ID	Frecuencia
Label	Dejar en blanco.
Default Value	$100e^6$ este valor se representa como 100×10^6 , es decir 100 MHz.
Minimum	$25e^6$
Maximum	$1,750e^6$
Num Steps	1,000

Continuación tabla V.

Style	Horizontal
Converter	Float

Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Configuración de rango de frecuencia**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.3.3. Configuración de ancho de banda

En este bloque se configurará el ancho de banda a usarse con el RTL-SDR, tal como se vio en las especificaciones técnicas.

Tabla VI. **Configuración de ancho de banda**

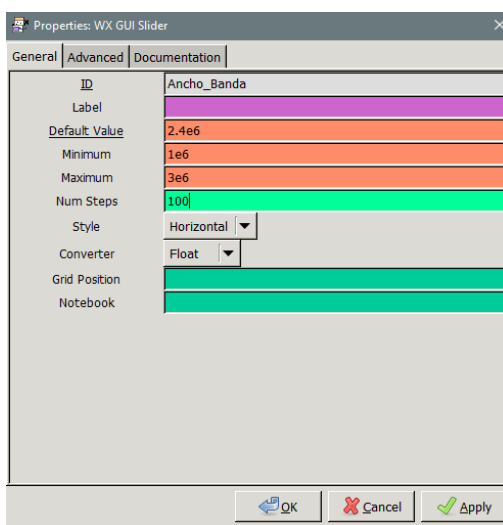
Parámetro	Descripción
ID	Ancho banda
Label	Dejar en blanco
Default Value	2.4e ⁶
Minimum	1e ⁶

Continuación tabla VI.

Maximum	3e ⁶
Num Steps	100
Style	Horizontal
Converter	Float

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Configuración de ancho de banda**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.4. Configuración de bloque Osmocom Source

En este bloque se configurarán los parámetros principales para el uso del RTL-SDR, específicamente con el RTL2832U. Es compatible este bloque, por tanto, cabe resaltar que este bloque es el intermediario entre la parte de hardware y software GNU Radio.

Tabla VII. Descripción y configuración de bloque Osmocom Source

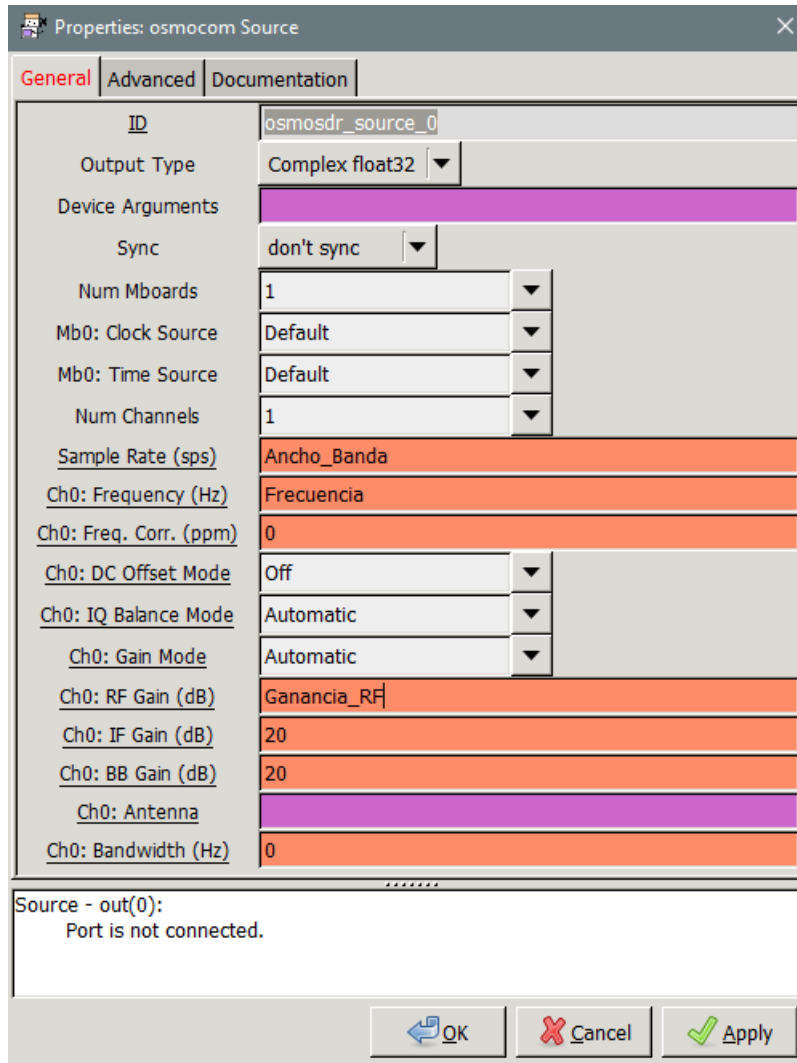
Parámetro	Descripción
ID	Identificación de bloque. Para este caso no se modificará.
Output Type	El tipo de salida de datos siempre estará por defecto en <code>complex_float32</code> .
Device Argument	Es una cadena delimitada por comas que se utiliza para ubicar dispositivos en su sistema. Los argumentos de dispositivo para múltiples dispositivos se pueden dar separándolos con un espacio. Se usa la identificación del dispositivo o el nombre/serie para especificar un determinado dispositivo o una lista de dispositivos. Si se deja en blanco, se utilizará el primer dispositivo encontrado. Para este caso se dejará en blanco ya que únicamente se utilizará un dispositivo SDR.
Sync	Es el tipo de sincronización que tendrá el RTL2832U, para este caso se dejará sin sincronización.
Num mboards	Dejarlo por defecto en 1, ya que solo se está utilizando un dispositivo.
Mb0: Clock Source	Dejarlo en default, para este caso que se utiliza solo un SDR.
Mb0: Time Source	Dejarlo en default, para este caso que se utiliza solo un SDR.
Num Channels	Selecciona el número total de canales en esta configuración de múltiples dispositivos. Obligatorio al especificar varios argumentos de dispositivo. Para este caso lo dejamos en 1, ya que se está utilizando solo un SDR.
Sample Rate	La frecuencia de muestreo es el número de muestras por segundo emitidas por este bloque en cada canal. Para este parámetro se le colocará la identificación de Ancho_Banda, por lo cual tomará los datos del deslizador con esa identificación.
Ch0: Frequency	La frecuencia central es la frecuencia a la que está sintonizada la cadena de RF. Para este parámetro se colocará la identificación de Frecuencia, en la cual tomará los datos del deslizador con esa identificación.
Ch0: Freq. Corr.	El factor de corrección de frecuencia en partes por millón ppm. Establecer en 0 si se desconoce. Para este caso se dejará en 0.
Ch0: DC Offset Mode	Controla el comportamiento de la corrección del DC offset del hardware. Off: deshabilita el algoritmo de corrección (paso a través). Manual: Conserva la última corrección estimada cuando se cambia de automático a manual. Automático: encontrar periódicamente la mejor solución para compensar el DC offset. Esta funcionalidad está disponible solo para dispositivos USRP. Para este caso se dejará en Off.

Continuación tabla VII.

Ch0: IQ Balance Mode	Controla el comportamiento de la corrección de desequilibrio de IQ del software. Off: deshabilita el algoritmo de corrección (paso a través). Manual: conserva la última corrección estimada cuando se cambia de automático a manual. Automático: encuentre periódicamente la mejor solución para compensar las señales de imagen. Para este caso se dejará en automático.
Ch0: Gain Mode	Elige entre el modo de ganancia manual (predeterminado) y automático según corresponda. Para permitir el control manual de las etapas de ganancia de RF/IF/BB, se debe configurar el modo de ganancia manual. Actualmente, solo los dispositivos RTL-SDR admiten el modo de ganancia automática. Para este caso lo dejaremos en automática.
Ch0: RF Gain (dB)	Ganancia general de RF del dispositivo. Para este caso se utilizará el identificador "Ganancia RF" para manipularlo a conveniencia desde el deslizador.
Ch0: IF Gain (dB)	Ganancia general de frecuencia intermedia del dispositivo. Esta configuración está disponible para dispositivos RTL-SDR y OsmoSDR con sintonizadores E4000 y HackRF en modo de recepción y transmisión. Las observaciones conducen a un rango de ganancia razonable de 15 a 30 dB. Para este caso se dejará en 20 dB.
Ch0: BB Gain (dB)	Ganancia general de banda base del dispositivo. Esta configuración está disponible para HackRF en modo de recepción. Las observaciones conducen a un rango de ganancia razonable de 15 a 30 dB. Para este caso se dejará en 20 dB.
Ch0: Antenna	Para dispositivos con una sola antena, esto puede dejarse en blanco. De lo contrario, el usuario debe especificar una de las posibles opciones de antena. Para este caso se dejará en blanco, ya que se usará una sola antena.
Ch0: Bandwidth	Configura el filtro de paso de banda en la interfaz de radio. Para utilizar la configuración de filtro de ancho de banda predeterminada (automática), debe ser cero. Para este caso se dejará en 0.

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Configuración bloque Osmocom Source

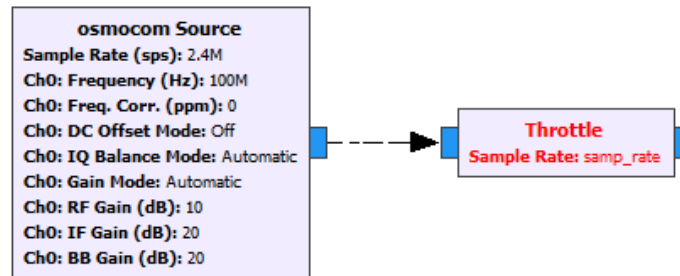


Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.5. Conexión entre bloques

Para conectar bloques entre sí, se debe dar clic sobre la salida del bloque y dar clic de nuevo sobre la entrada del bloque a unir. Se dibujará una flecha entre bloques, dando a entender que están conectados.

Figura 61. **Conexión entre bloques**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.6. Configuración de bloque Throttle

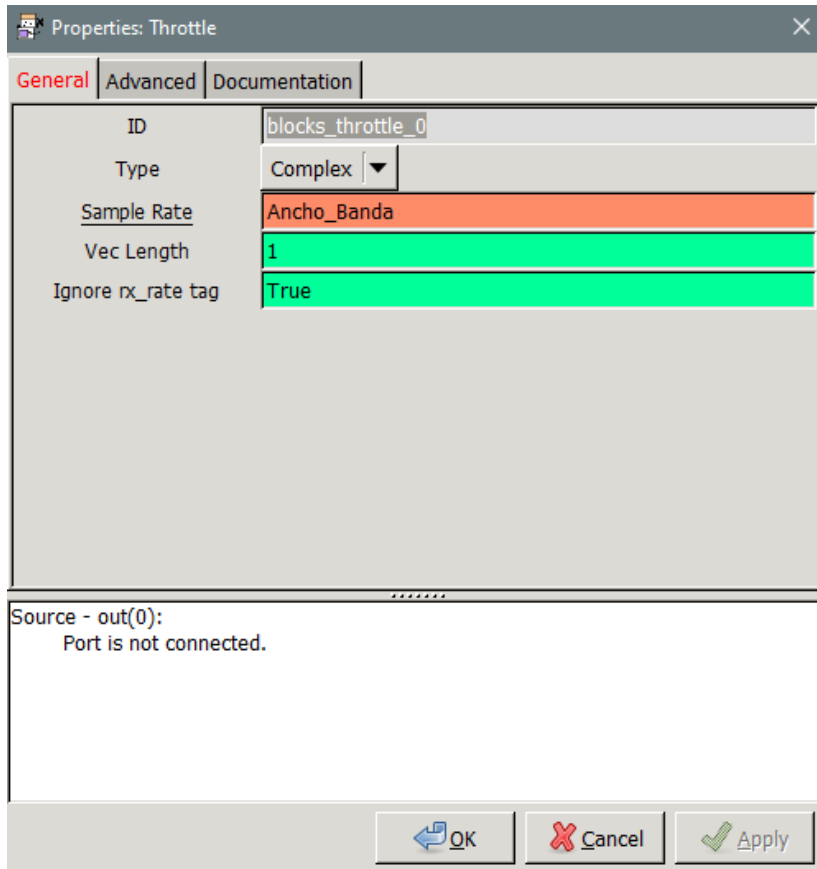
Este bloque se encarga de reducir el uso del CPU, con lo cual se evita que el proyecto pueda detenerse o presentar errores durante la ejecución.

Tabla VIII. **Parámetros y configuración de bloque Throttle**

Parámetro	Descripción
ID	Identificación de bloque, dejarlo como esta por defecto.
Type	Tipo de datos que manejará el bloque, debido a que en la entrada maneja datos complejos, se dejará en Complex.
Sample Rate	Tasa de muestreo limitante para el CPU. En este caso se colocará la identificación de Ancho banda.
Vec Length	Longitud de vector, dejarlo por defecto en 1.
Ignore rx_rage tag	Dejarlo por defecto en True.

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Configuración de bloque Throttle



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.7. Configuración de bloque WX GUI FFT Sink

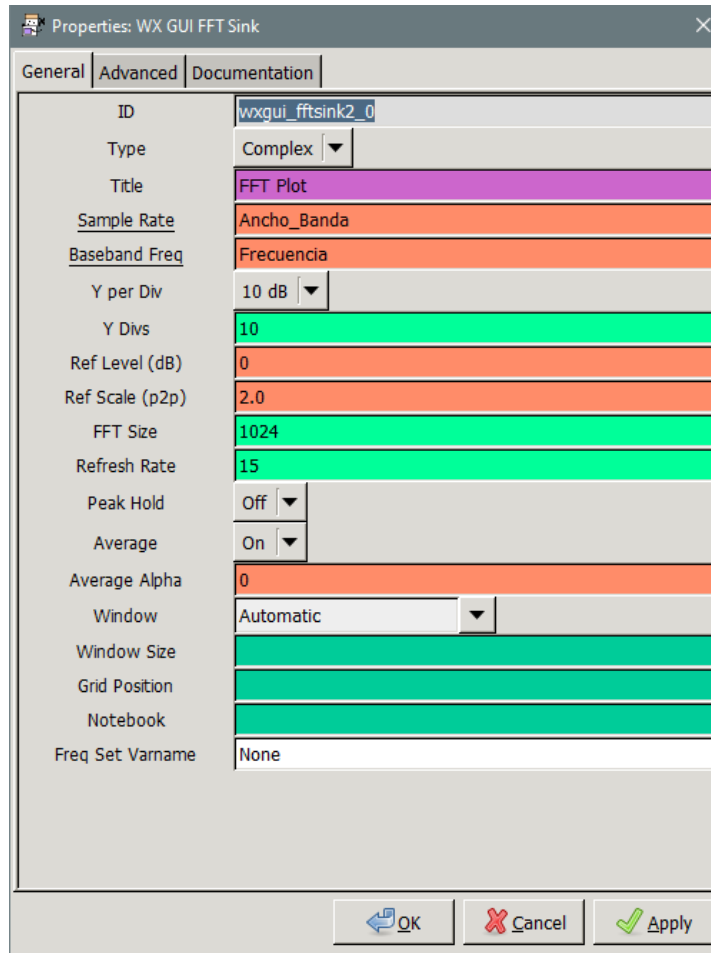
Este bloque mostrará los datos recibidos por el hardware RTL-SDR, de forma gráfica, específicamente su espectro en frecuencia, esto cuando se ejecute el proyecto. El bloque está programado para funcionar como un algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

Tabla IX. **Parámetros y configuración de bloque WX GUI FFT Sink**

Parámetro	Descripción
ID	Identificador de bloque.
Type	Tipo de datos de entrada, se seguirá configurando en modo complejo, ya que son los datos manejados desde la fuente.
Title	Título de la ventana.
Sample Rate	Tasa de muestreo, se colocará la identificación Ancho_banda, para que trabaje sobre los valores que se manejen desde el deslizador.
Baseband Freq.	Frecuencia de banda base es la frecuencia sobre la que trabajara en tiempo real. Se colocará la identificación Frecuencia, con el deslizador se colocará a la frecuencia que se quiera analizar.
Y per Div	Segmentación eje Y por divisiones. Se dejará por defecto 10dB por división en el eje Y de visualización.
Y Divs	Cantidad de divisiones en la visualización del eje Y.
Ref Level dB	Dejar por defecto 0.
Ref Scale p2p	Dejar por defecto 2.0.
FFT Size	Tamaño de muestreo para la transformada rápida de Fourier, se dejará en 1,024 muestras, es decir 2^{10} , de preferencia siempre utilizar valores de potencia de 2. Se pueden utilizar otras potencias, tomar en cuenta que mientras mayor cantidad de muestras más lento se ejecutara el proyecto.
Refresh Rate	Refrescar tasa de muestreo, dejar por defecto a 15.
Peak Hold	Retención de pico, dejarlo en Off.
Average	Promedio, dejarlo en On.
Average Alpha	Se dejará en 0, para que realice un promedio automático.
Window	Ventaneado, dejarlo en automático. Esto corregirá la tasa de muestreo, más conocido como corrección de errores, se puede elegir otros tipos para análisis más avanzados.

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Configuración de bloque WX GUI FFT Sink



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.2.8. Configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink

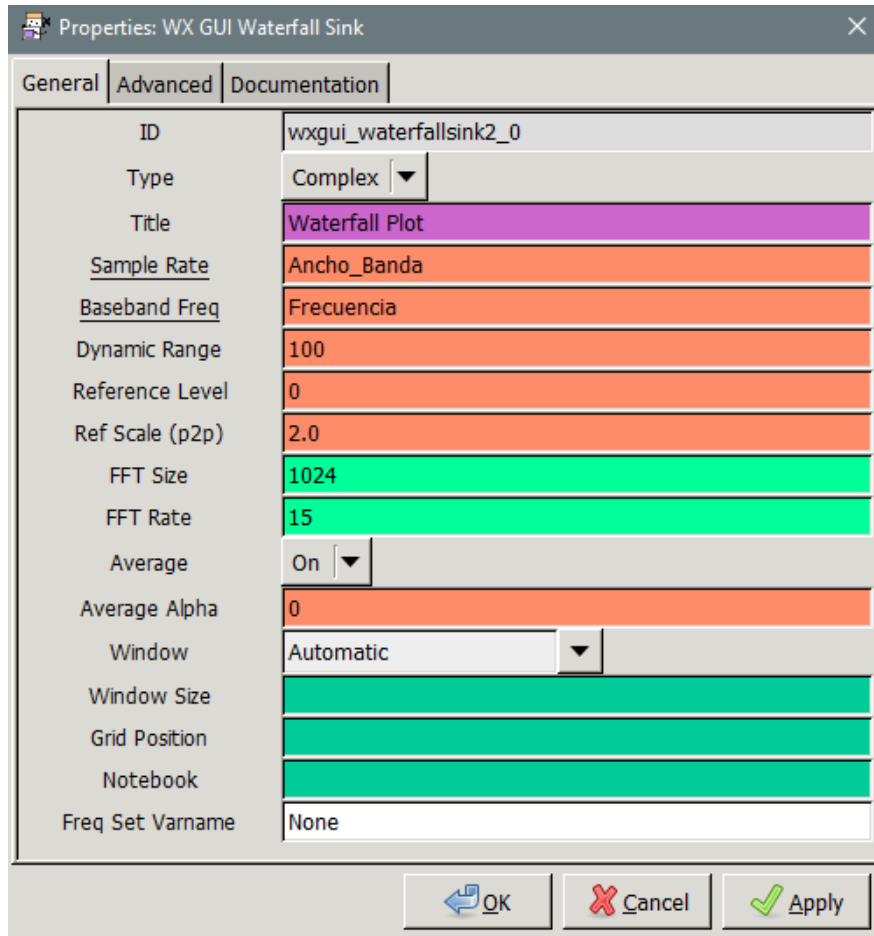
Este bloque tiene el análisis muy similar al del bloque WX GUI FFT Sink. Se diferencia por la visualización que ofrece más interactivo por diferencia de colores. Como su nombre lo indica, la visualización parece una cascada. Este bloque estará conectado en paralelo con el bloque WX GUI FFT Sink y será también el último bloque a configurar en el diseño propuesto.

Tabla X. **Parámetros y configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink**

Parámetro	Descripción
ID	Identificador de bloque.
Type	Tipo de datos de entrada. Se seguirá configurando en modo complejo, ya que son los datos manejados desde la fuente.
Title	Título de la ventana.
Sample Rate	Tasa de muestreo. Se colocará la identificación Ancho banda, para que trabaje sobre los valores que se manejen desde el deslizador.
Baseband Freq.	Frecuencia de banda base es la frecuencia sobre la que trabajará en tiempo real. Se colocará la identificación Frecuencia, con el deslizador se colocará a la frecuencia que se quiera analizar.
Dynamic Range	Rango dinámico, dejarlo por defecto en 100.
Ref Level dB	Dejar por defecto 0.
Ref Scale p2p	Dejar por defecto 2.0.
FFT Size	Tamaño de muestreo para la transformada rápida de Fourier, se dejará en 1,024 muestras, es decir 2^{10} , de preferencia siempre utilizar valores de potencia de 2. Se pueden utilizar otras potencias, tomar en cuenta que mientras mayor cantidad de muestras más lento se ejecutará el proyecto.
FFT Rate	Tasa a la que la transformada rápida de Fourier sacará muestras, dejar por defecto a 15.
Average	Promedio, dejarlo en On.
Average Alpha	Se dejará en 0, para que realice un promedio automático.
Window	Ventaneado, dejarlo en automático. Esto corregirá la tasa de muestreo, más conocido como corrección de errores. Se puede elegir otros tipos para análisis más avanzados.

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Configuración de bloque WX GUI Waterfall Sink



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

3.3. Conexión de Hardware RTL-SDR a computadora

La conexión se realiza de forma normal a cualquier puerto USB 2.0 disponible, teniendo ya los drivers instalados de forma correcta, se puede utilizar el equipo sin problema. En este caso, se conectó por medio de una extensión USB para que el equipo sea más manipulable. Si se utiliza una de estas

extensiones, debe estar blindada para evitar la mayor cantidad de pérdida e interferencia.

Figura 65. **Conexión de RTL-SDR con extensión USB**



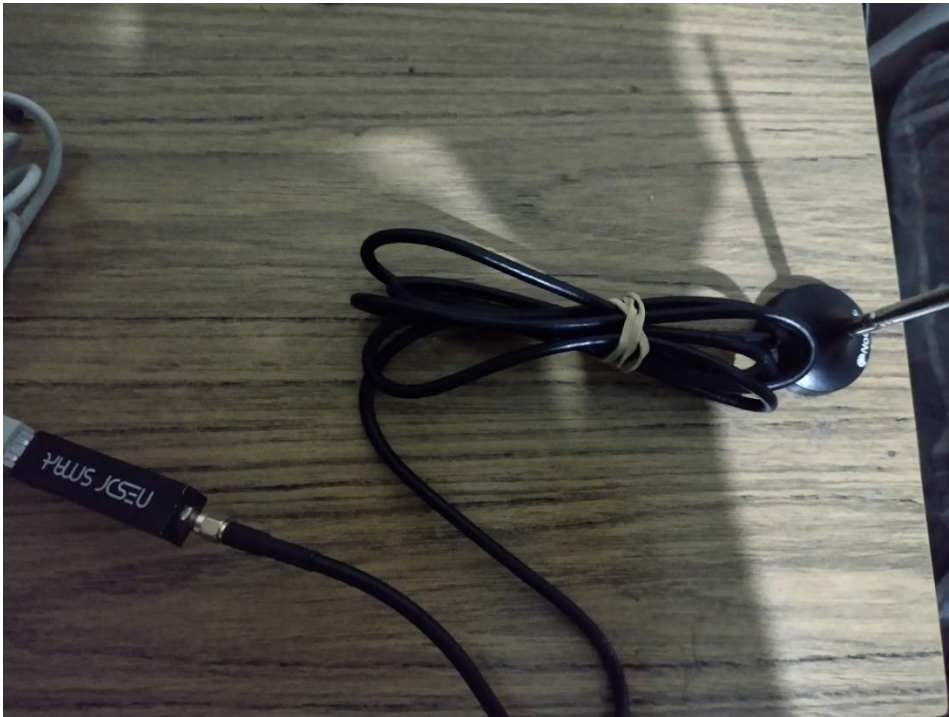
Fuente: [Fotografía de Eduardo Andrés Natareno]. (Mixco, Guatemala. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

3.3.1. **Conexión de antena monopolo telescópica a RTL-SDR**

La conexión del mástil de la antena se realiza por medio de conectores SMA hembra en el RTL-SDR y macho con el mástil antena. El proveedor brinda los datos básicos de la antena siendo esta de 50 ohmios y la antena cuenta con longitud de 15 cm a 60 cm, siendo esta compatible con señales de frecuencias aproximadas desde 60 MHz a 1.1 GHz. Según sea la frecuencia por recibir de

mejor manera, se alargará o encogerá la antena. De igual forma, se pueden emplear antenas de creación propia o adquirirlas con la misma marca. Para este diseño únicamente se utilizará la antena telescópica.

Figura 66. **Conexión de antena monopolo telescópica a RTL-SDR**



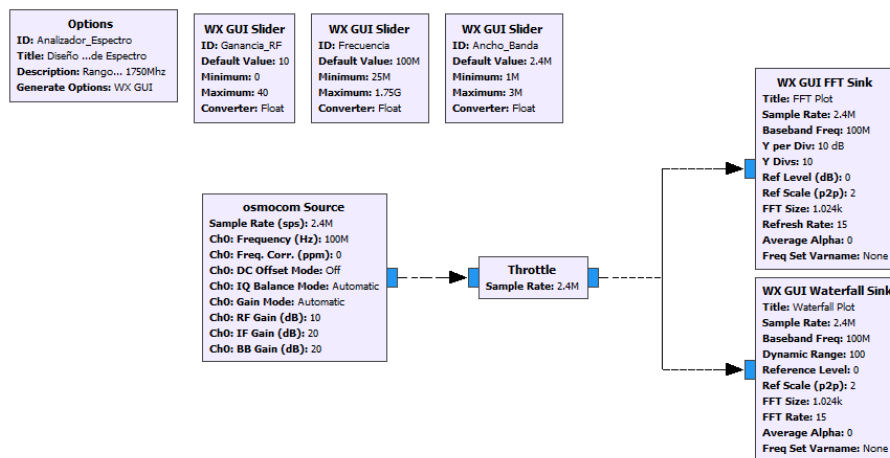
Fuente: [Fotografía de Eduardo Andrés Natareno]. (Mixco, Guatemala. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultado de ejecución de diagrama de flujo en GNU Radio

Para el respectivo análisis se deberá ejecutar el proyecto, para esto se deberá de presionar en la barra de herramientas el icono de ejecutar diagrama de flujo o Run.

Figura 67. Diagrama de flujo completo del diseño del analizador de espectro en GNU Radio



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Al momento de ejecutar el proyecto en la barra de herramientas no deberá marcar errores. Se activará el icono para detener la ejecución del diagrama, este se presionará para terminar el análisis.

Figura 68. **Icono para detener ejecución de diagrama**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

En el panel de consola se mostrarán los mensajes de error o de advertencia que se generen al momento de ejecutar el proyecto. En este caso no se observan mensajes de error, únicamente avisos de ejecución.

Figura 69. **Panel de consola en ejecución de proyecto**

```
Executing: C:\Program Files\GNURadio-3.7\gr-python27
\python.exe -u C:\Users\andre\Documents
\Analizador_Espect

Win32; Microsoft Visual C++ version 14.0; Boost_106000;
UHD_003.010.001.001-0-unknown

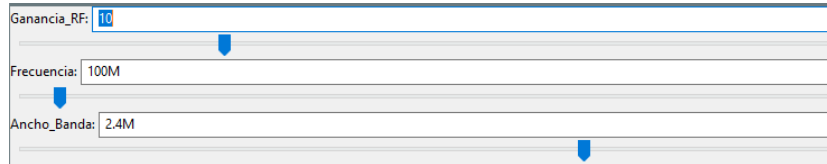
gr-osmosdr ae686c46 (0.1.5git) gnuradio 3.7.11
built-in source types: file osmosdr fcd rtl_tcp uhd hackrf
bladerf airspy redpitaya
Using device #0 Realtek RTL2838UHDIR SN: 00000001
Found Rafael Micro R820T tuner
[R82XX] PLL not locked!
[R82XX] PLL not locked!
gr::pagesize: no info; setting pagesize = 4096
```

Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.1.1. **Interfaz de bloque WX GUI Slider**

Al momento de ejecutar el diagrama de flujo, se mostrará una ventana con la interfaz general de los bloques que tengan esta configuración, en los cuales permite modificar ciertos parámetros en tiempo real, que permiten al usuario manipularlo hasta cierto punto. Para el bloque deslizador se tienen dos opciones: mover el deslizador manualmente con el puntero hasta obtener el valor deseado o en la celda colocar el valor exacto que se requiera.

Figura 70. **Interfaz gráfica de bloque WX GUI Slider**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.1.2. **Interfaz de bloque WX GUI FFT Sink**

La interfaz de este bloque destaca por tener más opciones para cambios de visualización y análisis que se requiera hacer a grandes rasgos. A estas opciones se le llama: opciones de rastreo.

Tabla XI. **Parámetros de visualización interfaz gráfica de bloque WX GUI FFT Sink**

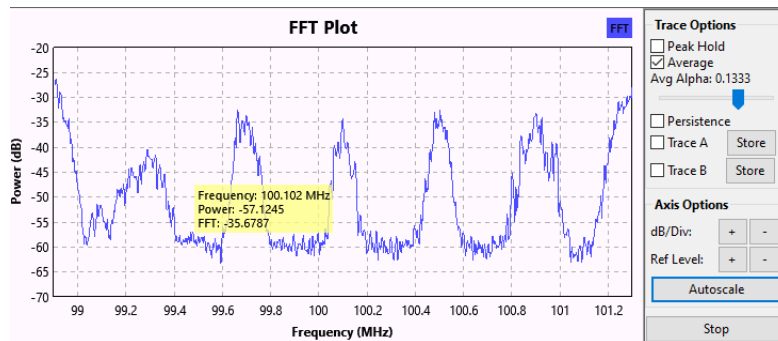
Parámetro	Descripción
Peak Hold	Pico retenido, deja marcado el pico más alto obtenido en el gráfico del espectro de frecuencia, deja una marca color verde, se puede activar y desactivar durante la ejecución.
Average	Promedio, este ayuda a tener una visualización más precisa del espectro, al dejarlo activado este estará en modo automático.
Persistence	Deja marcado por un breve tiempo la tendencia del espectro de frecuencia, visualmente se aprecia como un difuminado.
Trace A y B	Rastreo A y B, deja marcado el espectro de frecuencia al activarlo y tiene opción a actualizar cada vez que se requiera.
Axis Options	Son las opciones de ejes en las cuales están la potencia, eje Y, ambas son para este eje, dB/div aumenta la escala visual y la referencia de nivel, Ref Level, corre el eje según se requiera.
Autoscale	Este botón realiza la escala automática, esto en casos cuando la señal cambia o se está recibiendo una señal diferente a la anterior analizada.

Continuación tabla XI.

Stop	Detiene la visualización. Funciona para congelar la imagen del espectro de frecuencia, pero no detiene la ejecución del diagrama.
Datos de puntero	Se visualiza un cuadro donde proporciona tres valores los cuales son frecuencia, potencia y FFT. Estos datos sirven para análisis de espectro.

Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Interfaz gráfica de bloque WX GUI FFT Sink**



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.1.3. **Interfaz de bloque WX GUI Waterfall Sink**

La interfaz gráfica de este bloque es similar al del bloque WX GUI FFT Sink. Tal como se había visto anteriormente, sus parámetros también son similares, sin embargo, la visualización cambia.

Tabla XII. **Parámetros de visualización interfaz gráfica de bloque WX GUI Waterfall Sink**

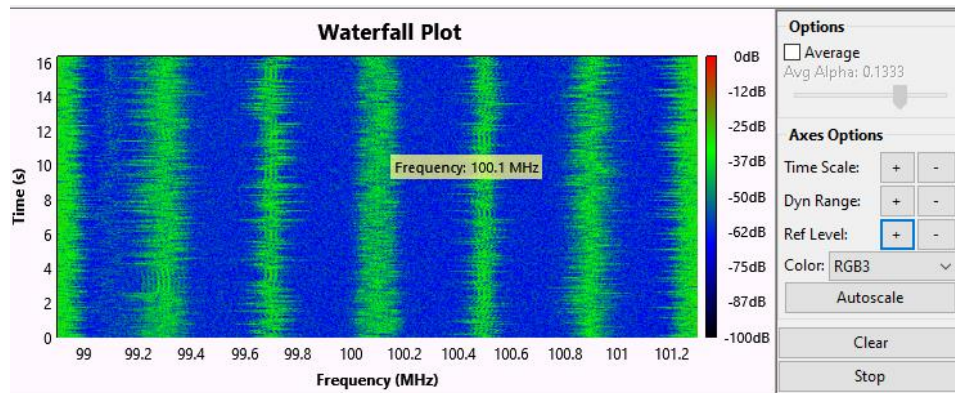
Parámetro	Descripción
Average	Promedio, este ayuda a tener una visualización más precisa del espectro, al dejarlo activado este estará en modo automático. En este modo la visualización se ve más difuminada.

Continuación tabla XII.

Axes Options	Estas son las opciones de modificar el eje Y.
Time Scale	Es el periodo de tiempo que se tiene la visualización del espectro en la interfaz. Este se puede modificar a que sea más corto o largo.
Dyn Range	Este modifica en valores grandes la escala de potencia que se tiene como referencia en los colores RGB.
Ref Level	Modifica en pequeños pasos el color de referencia que se tiene según la potencia recibida en dB.
Color	Se puede elegir entre tres tipos de RGB y escala de grises para visualizar el espectro.
Autoscale	Este botón realiza la escala automática. Se utiliza en casos cuando la señal cambia o se está recibiendo una señal diferente a la anterior analizada.
Stop	Detiene la visualización. Funciona para congelar la imagen del espectro de frecuencia, pero no detiene la ejecución del diagrama.
Clear	Se encarga de limpiar la visualización de espectro en caso se modifique algún parámetro de visualización.
Datos de puntero	Se visualiza únicamente la frecuencia a la que estamos apuntando.

Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Interfaz gráfica de bloque WX GUI Waterfall Sink



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.2. Resultados de pruebas a análisis de radio comercial FM

Se realizaron varias pruebas para visualizar el espectro de frecuencia de la banda comercial de radio FM. Esta está comprendida desde los 88 MHz a los 108 MHz con un ancho de banda de 200 KHz por emisora y separación de 400 KHz entre canales de emisoras. Se encuentra dentro del rango de aplicación del SDR.

4.2.1. Prueba en frecuencia de 88.1 MHz y 107.7 MHz

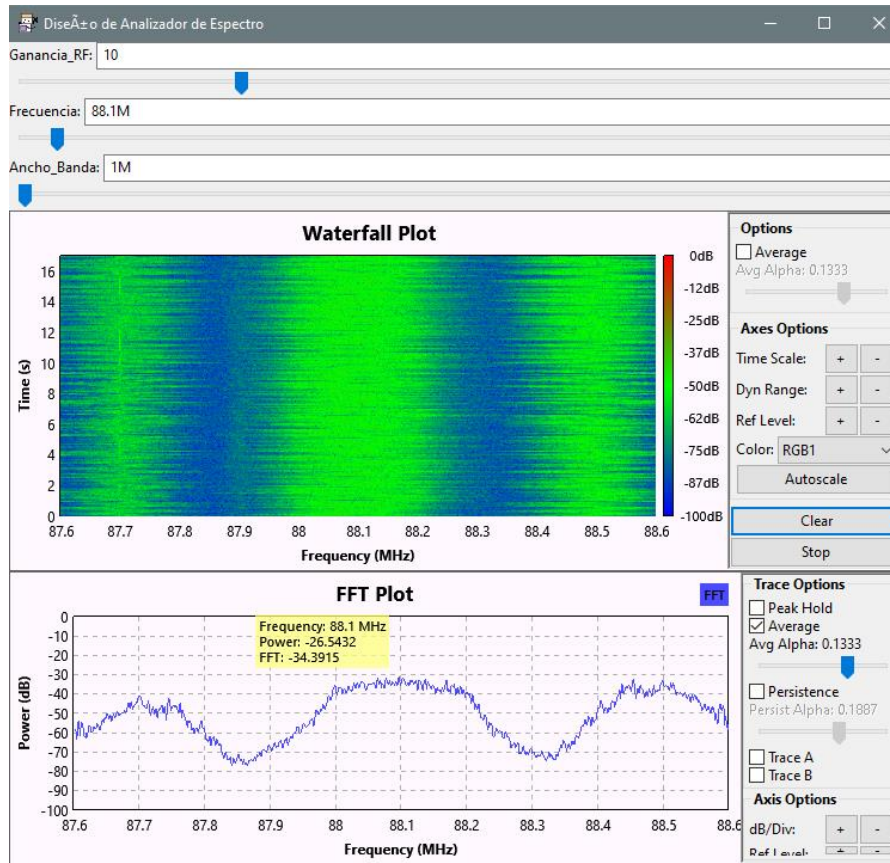
Se realizó esta prueba de modo satisfactorio, ya que las frecuencias descritas de 88.1 MHz y 107.7 MHz siendo los extremos de la banda comercial FM en Guatemala, fueron recibidas y analizadas por el RTL-SDR y el diseño propuesto de analizador de espectro.

Tabla XIII. Configuración de Sliders para análisis de 88.1 MHz FM

Variable	Valor
Ganancia_RF	10 dB
Frecuencia	88.1 MHz
Ancho_Banda	1 MHz

Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Resultado de análisis en 88.1 MHz



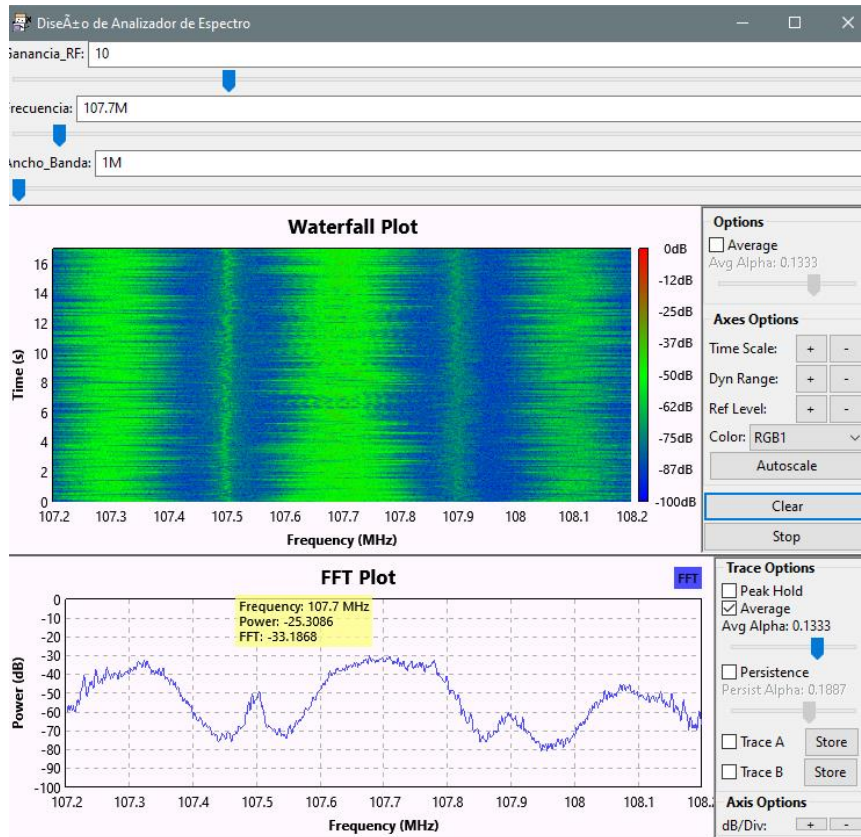
Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Tabla XIV. Configuración de Sliders para análisis de 107.7 MHz FM

Variable	Valor
Ganancia_RF	10 dB
Frecuencia	107.7 MHz
Ancho_Banda	1 MHz

Fuente: elaboración propia.

Figura 74. Resultado de análisis en 107.7 MHz



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.3. Resultados de pruebas a análisis de radiodifusión televisiva VHF

El análisis de este tipo de espectro de frecuencia se debe realizar por separado, debido a que el ancho de banda utilizado para esta radiodifusión es de 6 MHz. El ancho de banda máximo trabajable es para el RTL-SDR de 3 MHz, por lo tanto, las portadoras de audio y video se verán por separado.

Tabla XV. **Radiodifusión de canal 3 en banda VHF**

Límite Inferior MHz	Límite Superior MHz	Portadora de Video MHz	Portadora de Audio MHz
60	66	61.25	65.75

Fuente: <https://sit.gob.gt/gerencia-de-frecuencias/espectro-radio-electrico/radiodifusion/>.

Consulta: febrero de 2022.

Tabla XVI. **Configuración de Sliders para análisis de canal 3 VHF
portadora de video**

Variable	Valor
Ganancia_RF	25 dB
Frecuencia	61.25 MHz
Ancho_Banda	2.5 MHz

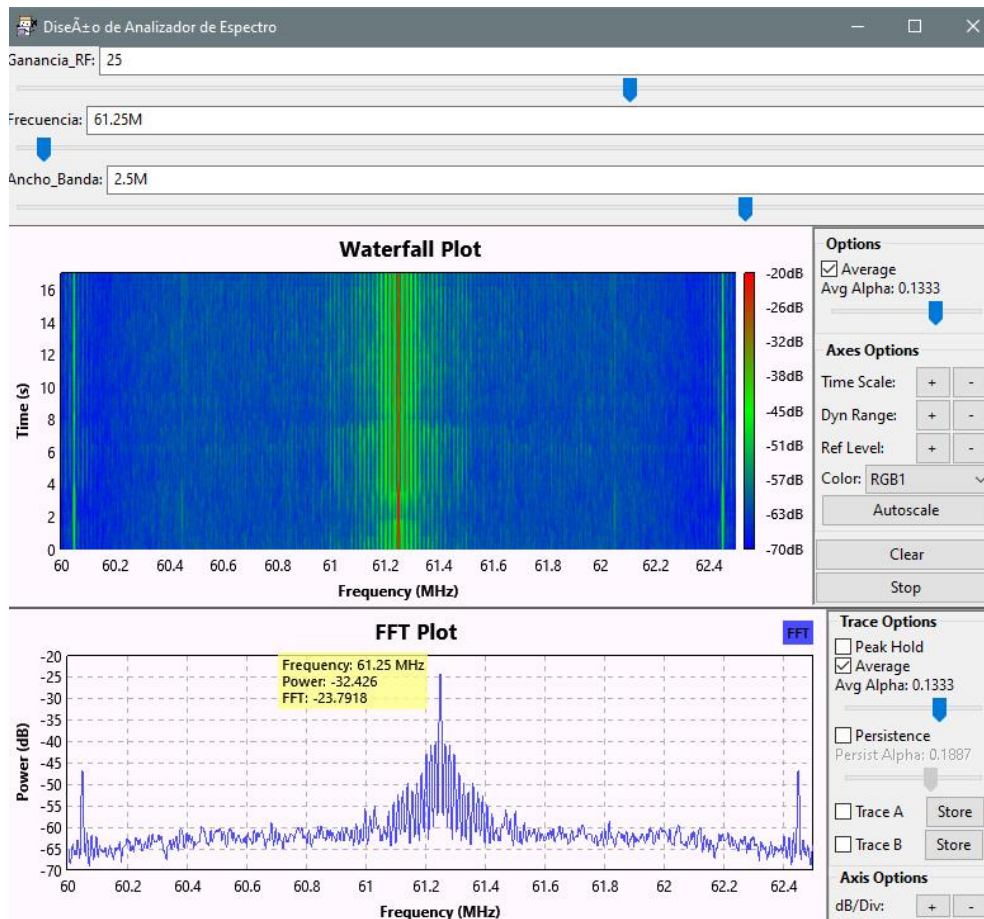
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Configuración de Sliders para análisis de canal 3 VHF
portadora de audio**

Variable	Valor
Ganancia_RF	25 dB
Frecuencia	65.75 MHz
Ancho_Banda	2.5 MHz

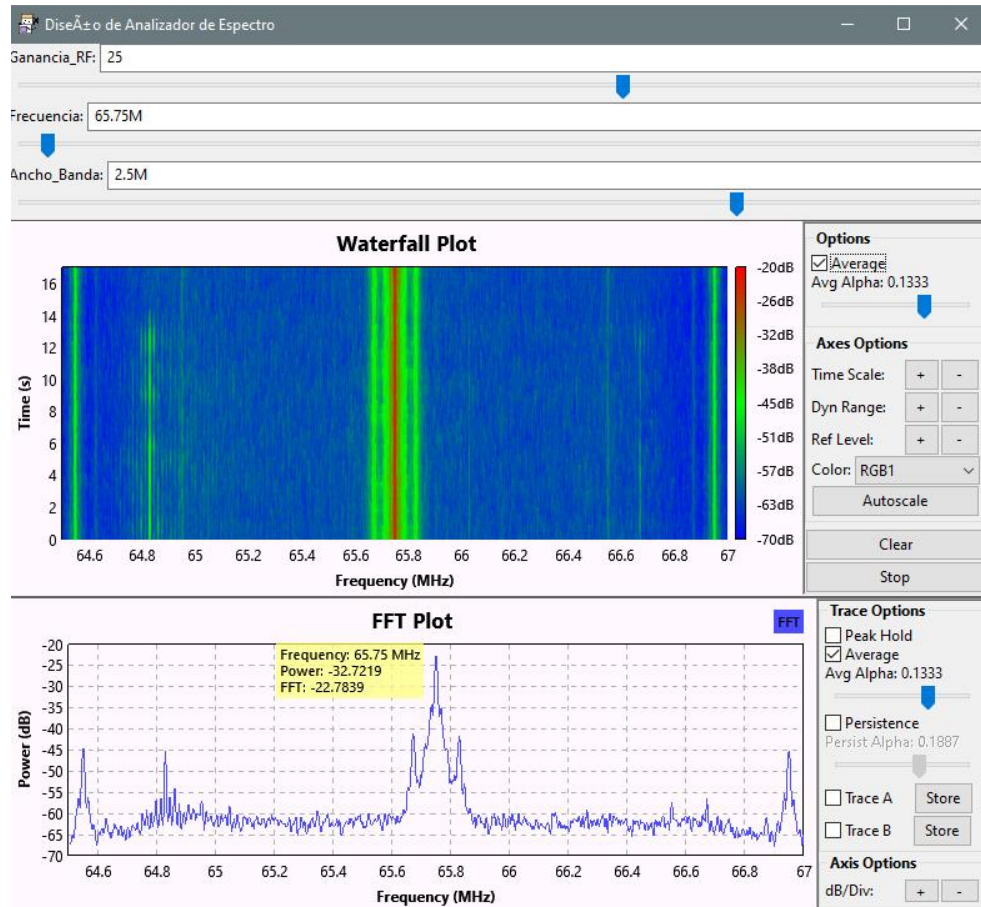
Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Resultado de análisis a portadora de video canal 3 VHF



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

Figura 76. Resultado de análisis a portadora de audio canal 3 VHF



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

4.4. Resultados de pruebas a análisis de llave RF

En esta prueba se pudo visualizar las diferentes tramas enviadas por el espacio de radiodifusión. Este tipo de llave posee 4 botones, los cuales cada uno envía diferente información por múltiples portadoras, esto en una frecuencia de 315 MHz.

Tabla XVIII. Radiodifusión de información por medio de llave RF 315MHz

Botones	Frecuencia de trabajo MHz
A, B, C y D	314.7 – 315.2

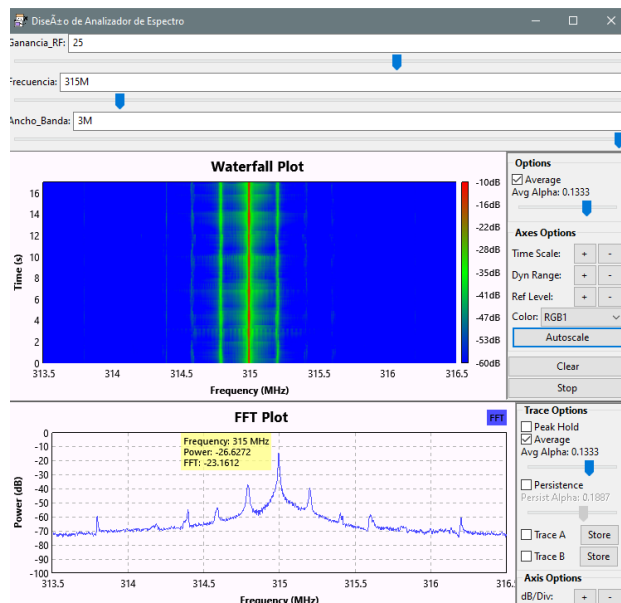
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Configuración de Sliders para análisis de llave RF

Variable	Valor
Ganancia_RF	25 dB
Frecuencia	315 MHz
Ancho_Banda	3 MHz

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. Resultado de análisis a llave RF 315 MHz



Fuente: elaboración propia, realizado con GNU Radio Companion.

5. ANÁLISIS DE COSTOS

En este apartado se analizará los precios totales del equipo, con los cuales se comprobará que la realización del diseño es de bajo costo. También un cuadro comparativo con otros equipos SDR y analizadores de espectro.

Si se requiere iniciar el diseño del analizador de espectro, se debe tomar en cuenta que para el procesamiento hay que contar con equipo de cómputo. Se hace un análisis con usuario sin computador y con computador. Este último es el que más se beneficia debido al bajo coste de adquisición de equipo.

Tabla XX. **Hardware utilizado en el diseño con computadora**

Equipo	Cantidad	Precio Unitario Q	Precio total Q
NooElec NESDR SMARTEE USB - Caja de aluminio – Entrada SMA & 3 antenas con mástil imantado con cable	1	489.00	489.00
Extensión 1.8 metros USB 2.0	1	25.00	25.00
Computadora portátil DELL Inspiron 3501 i3 4 GB RAM	1	3,545.00	3,545.00
		Costo total Q	4,059.00

Fuente: elaboración propia.

El proveedor NooElec ofrece el equipo con tres antenas disponibles para iniciar. Estas vienen incluidas en el costo del equipo SDR.

Tabla XXI. **Hardware utilizado en el diseño si el usuario tiene computadora**

Equipo	Cantidad	Precio Unitario Q	Precio total Q
NooElec NESDR SMArTee USB - Caja de aluminio – Entrada SMA & 3 antenas con mástil imantado con cable	1	489.00	489.00
Extensión 1.8 metros USB 2.0	1	25.00	25.00
		Costo total Q	514.00

Fuente: elaboración propia.

El paquete de software para GNU Radio es de licencia libre, por lo tanto, no tiene ningún costo de adquisición y licencia. Hace la realización del diseño propuesto mucho más accesible al no tener limitaciones de acceso a herramientas como en otros softwares con licencia.

Tabla XXII. **Software utilizado en el diseño con sistema operativo Windows o Linux**

Software	Precio Q
GNU Radio Companion Version 3.7.10.1	0.00
Costo total Q	0.00

Fuente: elaboración propia.

Otros equipos analizadores de espectro son de uso profesional, por lo tanto, es comprensible el costo de adquisición. Estos equipos llevan una circuitería más compleja y están sujetos a calibración como cualquier equipo de ingeniería.

Tabla XXIII. **Costo de diferentes equipos para análisis de espectro**

Equipo	Costo Total Q
Siglent Technologies SSA3021X-TG Spectrum Analyzer, 9 KHz - 2.1 GHz	14,569.00
Rigol DSA815-TG Tracking Generator Spectrum Analyzer Rango de frecuencia de 9 KHz a 1.5 GHz.	10,499.00
HackRF One Software Defined Radio (SDR) & ANT500 Antenna - Transceptor Half-duplex de frecuencia de funcionamiento de 1 MHz a 6 GHz. Compatible con GNU Radio. No incluye computadora para procesamiento y visualización.	3,309.00

Fuente: Consultado el 8 de marzo de 2022. Recuperado de <https://guatemaladigital.com/>.

El costo – beneficio total es la cantidad de dinero que se ahorra en comparación de la adquisición de los equipos enlistados. El cálculo de comparación para los analizadores Siglent y Rigol, se aplicó con costo total con computadora del SDR Nooelec y con el HackRF se aplicó únicamente con el SDR.

Tabla XXIV. **Costo – beneficio de Nooelec SDR por equipo**

Equipo	Costo – beneficio Total Q
Siglent Technologies SSA3021X-TG Spectrum Analyzer, 9 KHz - 2.1 GHz	10,510.00
Rigol DSA815-TG Tracking Generator Spectrum Analyzer Rango de frecuencia de 9 KHz a 1.5 GHz.	6,440.00
HackRF One Software Defined Radio (SDR) y ANT500 Antenna - Transceptor Half-duplex de frecuencia de funcionamiento de 1 MHz a 6 GHz. Compatible con GNU Radio. No incluye computadora para procesamiento y visualización.	2,795.00

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se llevaron a cabo los fundamentos técnico y teórico del hardware SDR utilizado en la propuesta de diseño del analizador de espectro.
2. Se desarrollaron los fundamentos específicos para la utilización del software GNU Radio en la propuesta de diseño del analizador de espectro.
3. Se diseñó el diagrama de flujo para el diseño de análisis espectral y se desarrollaron los fundamentos para utilizar la interfaz gráfica para el análisis.
4. Se realizaron las pruebas respectivas dentro del rango de frecuencias descrito, siendo estas lógicas y correctas durante el análisis.
5. Se calcularon y compararon los costos totales del equipo utilizado dentro del diseño con otros equipos equivalentes dentro del análisis espectral. Se demostró que la adquisición y ejecución son de bajo costo comparado con los equipos comparados.

RECOMENDACIONES

1. Tomar el enfoque del presente trabajo de graduación para el manejo del equipo e interfaz dirigido a estudiantes de Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Telecomunicaciones y Radioaficionados.
2. Enfocar este prototipo de diseño para fines de aprendizaje y su uso en un ambiente puramente académico o de aficionado, también puede ser utilizado en ambientes profesionales de ingeniería, pero se sugiere seguir una rutina de calibración.
3. Considerar importante que, para varias horas de uso del equipo, se utilice un disipador de calor extra para el SDR y así evitar daños a corto plazo por sobrecalentamiento.
4. Tomar en cuenta el no ejecutar el diagrama de flujo en GNU Radio si no está conectada la antena al equipo y el equipo al computador para evitar errores en la interfaz.
5. Considerar este diseño propuesto totalmente escalable para diferentes aplicaciones como demodulación, descryptación y diferentes tipos de análisis más profundos.

REFERENCIAS

1. Balmer. (1991). *Signals and Systems: An Introduction*. Londres, U.K.: Prentice-Hall.
2. Bellido, Enrique. (2013). *Instalación y configuración de sistemas operativos (MF0219_2)*. Madrid, España: CEP S. L. Recuperado de https://www.academia.edu/42020341/Instalación_y_configuració_d_e_sistemas_operativos.
3. Diagrama Esquemático del RTL-SDR. *Programador Clic*. (2020). Recuperado de <https://programmerclick.com/article/9651382065/>.
4. Grami, Ali. (2016). *Introduction to Digital Communications*. San Diego, USA: Elsevier Inc.
5. GNU Radio Project. (2021). *About GNU Radio*. Recuperado de <https://gnuradio.org/about/>.
6. GrOsmoSDR – Open Source Mobile Communications. *OSMOCOM*. (2021). Recuperado de <https://osmocom.org/projects/gr-osmosdr/wiki>.
7. Lázaro, Alejandro. (10 de noviembre, 2019) *Hardware y software: definiciones y conceptos* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.profesionalreview.com/2019/11/10/hardware-software-definiciones/>.

8. Lincango, F. V. (2018). *Implementación de un prototipo de sistema de comunicación inalámbrico OFDM en SDR* (tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://1library.co/article/interfaz-radio-radio-implementaci%C3%B3n-prototipo-sistema-comunicaci%C3%B3n-inal.y9629gvy>.
9. NESDR Receivers. *Nooelec*. (2021). Recuperado de <https://www.noelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nesdr.html>.
10. Oppenheim, Alan. Schafer, Ronald. (2011). *Tratamiento De Señales En Tiempo Discreto*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
11. Sánchez, Jorge. (Noviembre, 2013). Software 1. Sistema Operativo. Software de Aplicación. *Redcírculos, 2-4*. Recuperado de <https://proyectocirculos.files.wordpress.com/2013/11/software.pdf>.
12. Stremler, F. G. (2006). *Introducción a los Sistemas de Comunicación*. México: Pearson Educación.
13. Superintendencia de Telecomunicaciones – SIT (2021). *Radiodifusión*. Guatemala: Autor.
14. Tomasi, Wayne. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson Educación.