

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO DE ABAD DEL

CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,

INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE RADAR PARA
LA ESTIMACION DE LA ALTURA FORESTAL EN LA SELVA DE
SANTA ANA – CUSCO”**

PRESENTADO POR:

-Br. Diego Armando Mora Huaman

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

ASESOR:

Dr. Ing. Facundo Palomino Quispe

Financiado por: PROGRAMA “YACHAYNINCHIS

WIÑARINAMPAQ” - UNSAAC

CUSCO – PERÚ

2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE RADAR PARA LA ESTIMACION DE LA ALTURA FORESTAL EN LA SELVA DE SANTA ANA - CUSCO"

presentado por: DIEGO ARMANDO MORA HUAMAN con DNI Nro.: 48155865

presentado por: con DNI Nro.:

para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO ELECTRONICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 10 de AGOSTO de 2023



Firma

Post firma: FACUNDO PALOMINO QUISPE

Nro. de DNI: 00435194

ORCID del Asesor: 0000-0002-5447-6682

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: <https://unsaac.turnitin.com/originality/new/inbox/6240820a-8374-4d2b-ad26-ae@bd6dc98ba>

NOMBRE DEL TRABAJO

Diego Mora tesis Titulo.pdf

AUTOR

Diego Armando Mora Huaman

RECUENTO DE PALABRAS

14117 Words

RECUENTO DE CARACTERES

81813 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

98 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.6MB

FECHA DE ENTREGA

Jul 4, 2023 6:03 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jul 4, 2023 6:04 PM GMT-5**● 9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Fuentes excluidas manualmente
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Bloques de texto excluidos manualmente

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) por el financiamiento a través del convenio CONCYTEC-UNSAAC, según contrato de subvención N° 017-2017-UNSAAC, del Esquema financiero: E041-2017-UNSAAC-01, denominado “PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN” de la convocatoria 2017-1.

DEDICATORIA

Dedico este enorme esfuerzo a mi novia Any y mi bebe que viene en camino. A mis queridos Padres Beltran y Vicentina, mis hermanos Javier y Mabel porque ellos estuvieron apoyándome desde el inicio a fin y en situaciones complicadas, por darme aliento de vida y por la dedicación y confianza que tuvieron en mí.

Dedico este trabajo a Dios por velar mi salud, mi integridad e inteligencia, y no abandonarme, y también dedicar este trabajo a mi Asesor, a todos los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Amigos, Compañeros y toda mi Familia. Muchas gracias a todos.

Diego Armando Mora Huaman

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURA.....	ix
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción del Problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Formulación del Problema	3
1.3.1. Problema general	3
1.3.2. Problemas específicos.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Delimitación de Estudio.....	4
1.5.1. Delimitación Espacial.....	4

1.5.2.	Delimitación Temporal	5
1.6.	Variables	5
1.6.1.	Variable dependiente	5
1.6.2.	Variable independiente	5
1.7.	Metodología	5
1.7.1.	Tipo de Investigación	5
1.7.2.	Nivel de Investigación	6
1.7.3.	Diseño de Investigación.....	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....		7
2.1.	Antecedentes	7
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.....	7
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	8
2.2.	Bases Teóricas.....	9
2.2.1.	Radar FMCW	10
2.2.2.	Señal Chirp.....	12
2.2.3.	Resolución en Rango	13
2.2.4.	Frecuencias de Operación del Radar	14
2.3.	Radio definido por software o SDR	15
2.3.1.	Universal Software Radio Peripheral (USRP)	15
2.4.	Altura de los Arboles	16

CAPÍTULO III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	18
3.1. Diagrama de bloques del sistema	18
3.2. Diseño e implementación del radar	19
3.2.1. Selección de Equipo como Radar	20
3.2.2. Selección de Antenas	25
3.2.3. Implementación de la etapa de transmisión y recepción.	28
3.2.4. Diseño del sistema de Adquisición de datos.	37
3.2.5. Implementación del Sistema Adquisición de Datos	38
3.3. Diseño e implementación del Preprocesamiento.....	41
3.3.1. Implementación del preprocesamiento de las señales	42
3.4. Selección de Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)	44
3.5. Diseño e Implementación de la Etapa de alimentación	46
3.6. Sistema de radar montado en el UAV	48
CAPÍTULO IV PRUEBAS DEL SISTEMA RADAR	51
4.1. Pruebas en tierra usando Radar implementado y PC.....	51
4.2. Pruebas de Vuelo usando el UAV Matrice 600pro	57
4.2.1. Pruebas de vuelo con el sistema radar montado.....	61
CAPÍTULO V RESULTADOS	66
5.1. Resultados de las pruebas realizadas	66
5.2. Resultados finales	67

CAPÍTULO VI COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE RADAR IMPLEMENTADO CON OTROS MÉTODOS USADOS PARA MEDIR PARÁMETROS FORESTALES	70
6.1. Medición de Altura de los árboles utilizando medidor laser	70
6.2. Medición de Altura de los árboles utilizando técnicas manuales...	71
CAPÍTULO VII PRESUPUESTO	76
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS	80
ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Variable Independiente</i>	5
Tabla 2 <i>Variable Dependiente</i>	5
Tabla 3 <i>Banda de frecuencias para diferentes aplicaciones</i>	14
Tabla 4 <i>Comparación entre equipos para selección de radar</i>	22
Tabla 5 <i>Características del dispositivo USRP 2920</i>	23
Tabla 6 <i>Conexiones externas del dispositivo USRP 2920</i>	24
Tabla 7 <i>Comparación entre UAVs</i>	46
Tabla 8 <i>Requerimiento de voltaje y amperaje</i>	46
Tabla 9 <i>Peso por cada Dispositivo y accesorio</i>	48
Tabla 10 <i>Autonomía de vuelo para diferentes cargas</i>	61
Tabla 11 <i>Alturas medidas utilizando medidor laser</i>	71
Tabla 12 <i>Comparación de alturas medidas utilizando el sistema de radar y utilizando medidor laser.</i>	71
Tabla 13 <i>Cuadro de distribuciones por ecozonas</i>	72
Tabla 14 <i>Medición de parcelas según su dificultad en la toma de datos</i>	73
Tabla 15 <i>Proyectado de la medición de parcelas usando el sistema de radar implementado</i>	74
Tabla 16 <i>Comparación de las características de sistema de radar implementado con el método manual de medición de parámetros forestales</i>	74
Tabla 17 <i>Costo de implementación</i>	76

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 <i>Ubicación del lugar donde se realizará las pruebas</i>	4
Figura 2 <i>Rada de onda continua (CW) usando efecto doppler</i>	10
Figura 3 <i>Modulación lineal en frecuencia de una onda triangular para un objetivo estacionario</i>	11
Figura 4 <i>Señal Chirp</i>	13
Figura 5 <i>Diagrama básico del USRP</i>	16
Figura 6 <i>Tipos de altura de los árboles</i>	17
Figura 7 <i>Diagrama de bloques del sistema</i>	18
Figura 8 <i>Diagrama de bloques del radar FMCW</i>	19
Figura 9 <i>Analizador Vectorial de Redes N9914A</i>	20
Figura 10 <i>USRP 2920</i>	21
Figura 11 <i>Panel frontal NI USRP 2920</i>	23
Figura 12 <i>Antena Bocina</i>	26
Figura 13 <i>Antena Vivaldi</i>	26
Figura 14 <i>Medición de parámetros S11 de la antena Vivaldi utilizando VNA91428</i>	
Figura 15 <i>Interfaz GNU Radio Companion</i>	29
Figura 16 <i>Bloque “Properties: Options”</i>	30
Figura 17 <i>Bloque “Signal Source”</i>	32
Figura 18 <i>Bloque “VCO (Complex)”</i>	32
Figura 19 <i>Bloque “Throttle”</i>	33
Figura 20 <i>Bloque “UHD: USRP Sink”</i>	33
Figura 21 <i>Sin Bloque “QT GUI Time Sink” “QT GUI Frequency k”</i>	34

Figura 22 <i>Diagrama de la etapa de transmisión</i>	34
Figura 23 <i>Respuesta en el dominio del tiempo y respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal chirp que será transmitida.</i>	35
Figura 24 <i>Bloque “UHS: USRP Source” para la Recepción.</i>	36
Figura 25 <i>Radar FMCW en GNU radio</i>	36
Figura 26 <i>Raspberry Pi 4</i>	37
Figura 27 <i>Raspberry Pi 4 con periféricos</i>	39
Figura 28 <i>Ubuntu (Linux) en Raspberry Pi 4</i>	40
Figura 29 <i>GNU radio en Rapsberry Pi 4</i>	41
Figura 30 <i>Bloque “Wav File Sink”</i>	41
Figura 31 <i>Procesamiento general de señales FMCW</i>	42
Figura 32 <i>Preprocesamiento de señales de radar FMCW</i>	43
Figura 33 <i>Señal retrodispersada proveniente de los árboles</i>	44
Figura 34 <i>DJI Matrice 600 PRO</i>	45
Figura 35 <i>DJI Spreading Wings S1000</i>	45
Figura 36 <i>Power Bank Redmi</i>	47
Figura 37 <i>Diagrama de alimentación a dispositivos</i>	47
Figura 38 <i>Diagrama del UAV con el sistema de radar implementado</i>	49
Figura 39 <i>UAV con el sistema de radar</i>	49
Figura 40 <i>Conexión entre la PC-USRP</i>	51
Figura 41 <i>Comunicación entre la PC y USRP.</i>	52
Figura 42 <i>Distancia entre la antena transmisora y receptora</i>	52
Figura 43 <i>Diagrama de bloques de radar FMCW en GNU radio- conectado a PC</i>	53
Figura 44 <i>Diagrama de bloques de radar FMCW en GNU radio- conectado a PC</i>	54

Figura 45 Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 10 cm.	54
Figura 46 Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 100 cm.	55
Figura 47 Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 200 cm.	55
Figura 48 Espectrograma en Python (Detección de la pared).....	56
Figura 49 Espectrograma en MATLAB (Detección de la pared)	56
Figura 50 Control remoto de Drene matrice 600 pro conectado a Celular	57
Figura 51 Interface de software DJI GO de aplicativo móvil.	58
Figura 52 Cargas de 2.0 Kg, 2.9 Kg y 1.10 Kg.....	59
Figura 53 Drone con las diferentes cargas 2.0 Kg, 2.9 Kg y 1.10 Kg.	60
Figura 54 Sistema de radar montado en UAV	62
Figura 55 Radar FMCW implementado para pruebas de vuelo.....	63
Figura 56 Diagrama del sistema implementado para la toma de datos y estimación de la altura de los arboles.....	63
Figura 57 UAV con el sistema de radar realizando el barrido para la toma de datos	64
Figura 58 Espectrograma de la toma 1	66
Figura 59 Espectrograma de la toma 2	67
Figura 60 Espectrograma de las señales reflejadas	68
Figura 61 Distancia medida entre el UAV y la copa del árbol	69
Figura 62 Medición de la altura del árbol.....	70
Figura 63 Medición de la altura de los árboles utilizando instrumentos manuales.	72

RESUMEN

La presente tesis integra la utilización de sensores de radar a partir de equipos que se encuentran en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica - UNSAAC (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco) embarcados en un UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado). La importancia de usar los sistemas UAV surge desde el siglo XIX, debido a la ventaja de que puede llegar a zonas de difícil acceso para los seres humanos, como selvas, zonas hostiles o lugares peligrosos, además no requieren tripulación a bordo, por lo tanto, es ampliamente utilizada en aplicaciones como la fotografía, vigilancia, monitoreo forestal, etc.

En el presente trabajo para la obtención de título profesional de Ingeniero Electrónico, se desarrolla e implementa un sistema de radar que permita obtener la altura de los árboles en la selva de Santa Ana - Cusco. En la implementación del sistema de radar se utiliza; como radar una tarjeta periférica universal de software de radio (USRP) 2920, antenas Vivaldi para la transmisión y recepción de señales electromagnéticas con modulación FMCW, Raspberry Pi 4 para la adquisición de datos. La tarjeta se comunica con el Raspberry Pi 4 mediante una interfaz Gigabit Ethernet. Utilizando el software GNU Radio se implementa una señal chirp con frecuencia central de 2.1 GHz con ancho de banda de 1 MHz. Se obtiene un espectrograma que representa la distancia medida de la copa del árbol al dron a partir de dicha distancia se determina la altura de los árboles.

Palabras clave: Radar, FMCW, USRP, Altura del árbol

ABSTRACT

This thesis integrates the use of radar sensors from equipment found in the laboratory of the Professional School of Electronic Engineering - UNSAAC (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco) embarked on a UAV (Unmanned Aerial Vehicle). The importance of using UAV systems has arisen since the 19th century, due to the advantage that it can reach areas that are difficult for humans to access, such as jungles, hostile areas or dangerous places, in addition to not requiring crew on board, therefore Therefore, it is widely used in applications such as photography, surveillance, forest monitoring, etc.

The present thesis to obtain the professional title of Electronic Engineer, develops and implements a radar system that allows obtaining the height of the trees in the jungle of Santa Ana - Cusco. In the implementation of the radar system is used; as radar a Universal Radio Software Peripheral Card (USRP) 2920, Vivaldi antennas for the transmission and reception of electromagnetic signals with FMCW modulation, raspberry pi 4 for data acquisition. The card communicates with the Raspberry through a Gigabit Ethernet interface. Using the GNU Radio software, a chirp signal with a center frequency of 2.1 GHz is implemented with a bandwidth of 1 MHz. A spectrogram is obtained that represents.

Keywords: Radar, FMCW, USRP, tree height

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se siguen realizando y tomando datos de manera manual, sin embargo, el constante avance de la tecnología permite que todo este proceso se realice utilizando tecnologías que nos ayuden a tomar más datos y en menos tiempo. Existe una tecnología que nació con la intención de querer atacar a través de ondas electromagnéticas durante la segunda guerra mundial y al momento de realizar pruebas se logró detectar objetos. Desde ese entonces el radar es ampliamente usado para detectar objetos a largas distancias y medir estas distancias entre el objeto y radar.

El presente trabajo de tesis se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de radar basado en radio definido por software que tiene la capacidad de ser portable. Para esto ha sido fundamental entender la teoría de radares, además todo este sistema podrá ser transportado y cubrir mayores distancias. Utilizando un UAV se podrá tomar datos de lugares a los que no pueden acceder las personas.

Este estudio es una de las primeras experiencias en la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica – UNSAAC en temas de radares, lo que permitirá a los estudiantes de pregrado y egresados seguir ampliando las aplicaciones con el uso de tecnología de radar estacionario o portátil.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Descripción del Problema

En nuestro territorio nacional el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la agricultura y áreas forestales, son escasamente utilizadas tal como indican (Parí, Santana, Villanueva, & Zárate, 2017), además mencionan que el sector forestal tiene desafíos que requieren o necesitan de la intervención directa del estado, fomentando inversión, desarrollo de capacidades, generación de conocimientos y el uso de tecnologías para promover la investigación científica en el ámbito forestal con la finalidad de promover la concientización, participación pública y privada para la generación de información sobre árboles en la industrialización, productividad, capacitación y desarrollo económico.

(Masías, 2017; Masías, 2017), explica que existen dos métodos para medir la altura de los árboles, el primer método es directo, utilizando varas o reglas telescópicas, teniendo como limitante el tamaño del árbol, ya que solo es útil en especies de bajas alturas. El segundo método es indirecto, utilizando un hipsómetro basado en principios geométricos y trigonométricos, este instrumento presenta circunstancias en el que debido a la geografía del lugar no permita utilizarse. Cabe mencionar que la altura y diámetro, permite medir el volumen de los árboles.

Existe la necesidad presente de salvaguardar los bosques, para contrarrestar el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), por tal motivo se realizan inventarios forestales, consiguiendo entre varias variables, el volumen de los árboles, a partir del volumen se obtiene la biomasa del bosque (Meza, 2015). Los errores y las limitantes en los métodos para calcular la altura del árbol, generaría un mal cálculo de la biomasa, afectando

en las medidas de conservación de los bosques. Por lo tanto, se pretende implementar un sistema basado en tecnología de radar a partir de señales electromagnéticas, montado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), superando las limitaciones de los métodos tradicionales, consiguiendo resultados más precisos.

1.2. Justificación

El interés mundial acerca de la biomasa o cobertura forestal ha sido por valor energético por ser ventajosa, por ser energía renovable, abarcando toda materia orgánica; no obstante, la biomasa tiene su influencia positiva en la regulación del cambio climático que no era de importancia mundial (Rojas, 2015). Recién desde 1997 gracias al protocolo de Kioto acerca del cambio climático, se tuvo interés mundial por el cambio climático teniendo como meta de suma importancia la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Por tales motivos, se planteó la fijación de CO₂ como objetivo dentro de los criterios de monitoreo de bosques.

(Aldana, 2008) Citado por (Dionicio, 2019) dice que la evaluación de la biomasa se encuentra basada en un intenso trabajo de campo midiendo o estimando los elementos y parámetros de un árbol o del propio rodal. Cuya evaluación se realiza esporádicamente debido a la falta de un buen instrumento de medida y a las zonas de difícil acceso. La Medición Forestal implica medir el bosque y sus productos (Masías, 2017). Dimensionar la altura de los árboles utilizando el sistema de radar montado en el UAV podrá cubrir mayores zonas de la selva del Cusco, y servirá para los especialistas forestales; ya que les permitirá agilizar el proceso de toma de decisiones y facilitar el procesamiento y sistematización de la información recolectada, reduciendo el tiempo en la recolección de datos y consiguiendo

resultados más precisos. Además, los datos obtenidos serán de mucha utilidad para el monitoreo de bosques, inventario, economía forestal, etc.

Se hace factible el desarrollo de la presente tesis gracias al proyecto de investigación “DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN UAV PARA EL USO DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA SELVA ALTA DEL DISTRITO DE SANTA ANA EN LA CONVENCION”, financiado por el programa YACHAYNINCHIS WIÑARINAPAC en convenio con CONCYTEC.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema general

¿Es posible implementar un sistema de radar que pueda permitir obtener la altura forestal en las zonas de la Convención?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Es Posible diseñar e implementar un sistema de radar usando equipos de laboratorio de Telecomunicaciones - UNSAAC?
- ¿Es posible diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos?
- ¿Es posible diseñar e implementar un algoritmo para obtener la altura forestal?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de radar que permita obtener la altura forestal en zonas de La Convención.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Diseñar e implementar el sistema de radar usando los equipos de laboratorio Telecomunicaciones - UNSAAC.
- Diseñar e implementar el sistema de adquisición de datos.
- Diseñar e implementar un algoritmo de pre procesamiento para obtener la altura forestal.
- Realizar pruebas y validación del sistema.

1.5. **Delimitación de Estudio**

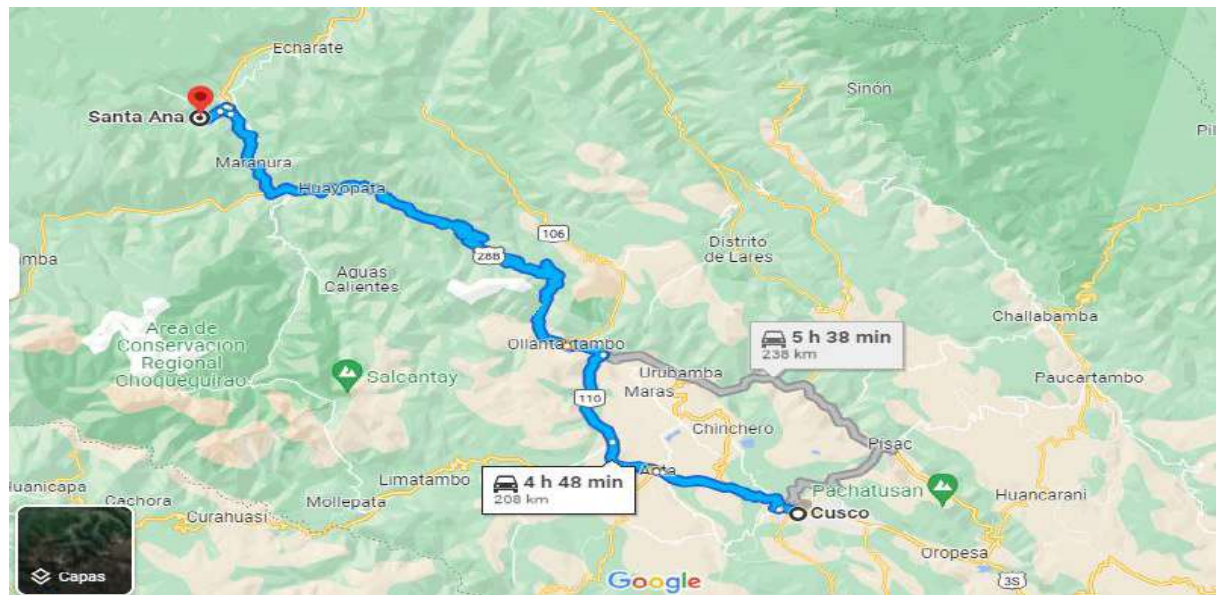
No se considera el diseño de la antena para la implementación del radar.

1.5.1. *Delimitación Espacial*

Los datos se tomaron del Balneario de Sambaray ubicado en el distrito de Santa Ana, provincia de La Convención, departamento de Cusco.

Figura 1

Ubicación del lugar donde se realizará las pruebas



Fuente: *Google maps.*

1.5.2. *Delimitación Temporal*

Los datos retrodispersados por el árbol, se obtuvieron durante el mes de septiembre del 2022.

1.6. Variables

1.6.1. *Variable dependiente*

Tabla 1

Variable Independiente

Variable	Indicadores
Altura del Árbol	Parámetro medido con el sistema de radar diseñado e implementado

Fuente: Elaboración propia.

1.6.2. *Variable independiente*

Tabla 2

Variable Dependiente

Variabes	Indicadores
Ancho de banda	Resolución de distancia
Frecuencia de operación	Reflectancia de la copa del árbol
Frecuencia de muestreo	Ancho de banda del sistema de radar

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Metodología

1.7.1. *Tipo de Investigación*

De acuerdo a las variables de investigación se encuentra dentro del enfoque de investigación cuantitativo ya que refleja la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de investigación (Hernández, 2014).

1.7.2. Nivel de Investigación

La presente tesis pertenece a un nivel de Investigación descriptiva, puesto que se centra en la recopilación de datos, es decir busca describir el estado y comportamiento de las variables que tiene como objeto de estudio (Hernández, 2014).

1.7.3. Diseño de Investigación

Según el tipo de Diseño de Investigación es: experimental transversal; por cuanto su estudio se basa en la manipulación de las variables independientes, además se considera transversal debido a que la toma de datos se realizará en un determinado momento y en un tiempo único (Hernández, 2014).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Un primer trabajo corresponde a (Felguera, 2013) quien realizó la tesis “Desarrollo de Técnicas Interferométricas para Radares de Alta Resolución en Milimétricas” para obtener el grado académico de Doctor en Tecnologías y Sistemas de Comunicaciones perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid, España. Tesis que tuvo como objetivo principal el desarrollo de técnicas interferométricas en radares, centrándose principalmente en el desarrollo de técnicas para radares que están relacionadas con el monitoreo de blancos móviles. Es importante mencionar que las técnicas interferométricas generalmente se usan para medir alturas de objetos y se hicieron muchas pruebas dirigidas a evidenciar el correcto funcionamiento del prototipo. En las primeras pruebas se puso en evidencia la dificultad de la realización de medidas interferométricas fuera de contextos ideales.

Como segundo trabajo corresponde a (Rojas, 2015), quien realizó la tesis “Estimación de Biomasa Forestal Mediante el uso de Imágenes Radar” para obtener el grado académico de Magister en Ingeniería Geodésica y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid, este proyecto tuvo como objetivo principal determinar una metodología para cuantificar la biomasa forestal mediante el uso de imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR). Las metodologías para obtener la biomasa forestal fueron mediante ecuaciones volumétricas, Fotografía Hemisférica Digital (DHP), Rastreo de Radiación y Arquitectura de Dosel y datos de microondas, que se puede mejorar la precisión de la biomasa determinando la densidad de los árboles.

Como tercer trabajo corresponde a (Pino, 2023), quien realizó la tesis “Diseño e implementación de un radar de banda estrecha, utilizando SDR para la detección de objetos y medición de distancia” para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Chimborazo. Esta tesis tuvo como objetivo principal diseñar e implementar un radar de banda estrecha, utilizando SDR para la detección de objetos y medición de distancia, cuyo diseño del sistema se realizó en el software GNU radio, además los resultados obtenidos ofrecen errores de medición menores al 5%.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

(Canelo & Quiñones, 2015) Quienes realizaron la tesis intitulada “Diseño e implementación de un Sistema de Radar Estático de Corto Alcance de Onda Continua en Frecuencia Modulada para Mediciones de Rango y Velocidad” tuvo como objetivo principal, el diseño e implementación de un sistema de radar estático con modulación FMCW capaz de medir la distancia y velocidad del objeto o blanco retrodispersador. Las pruebas y validaciones se realizaron utilizando una cinta métrica y velocímetro, midiendo la distancia recorrida por una persona y la velocidad de un auto, logrando verificar el correcto funcionamiento del radar cuya frecuencia de operación es de 2.4GHz. Resolución de distancia de 50cm, resolución de velocidad menor a 0.5 m/s y una velocidad máxima de 30 m/s , por lo tanto, es importante definir los parámetros del radar FMCW antes de diseñarlo e implementarlo.

Como segunda tesis se tuvo a (Caballero, 2015) quien realizó la tesis “Sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada montado en un vehículo aéreo no tripulado” para obtener el título del Ingeniero Electrónico, que tiene como

objetivo diseñar un sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada y montarlo en un UAV (vehículo aéreo no tripulado), con la finalidad de simular un radar de apertura sintética. Se logró implementar el sistema de adquisición de datos usando la Raspberry pi 2.

Como tercera tesis se tuvo a (Jancco, 2021) quien realizó la tesis “Diseño e implementación del procesamiento de señales SAR para estimación de la altura forestal” para obtener el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. La tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar el procesamiento SAR para estimación de la altura forestal. En esta tesis se implementó el algoritmo de Omega K utilizando datos crudos adquiridos por el satélite ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), y los datos MicroASAR.

2.2. Bases Teóricas

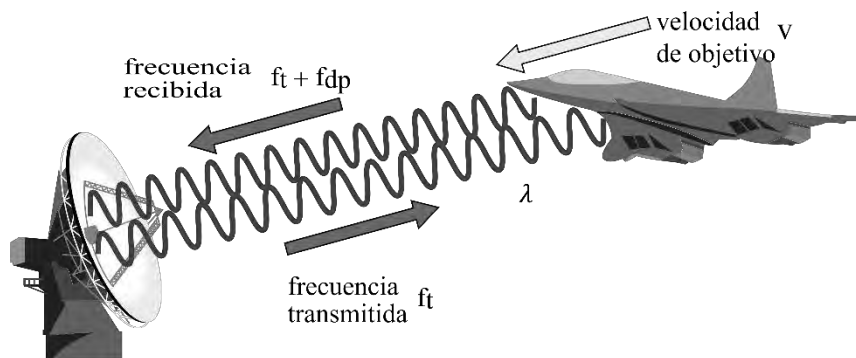
Los radares por la forma de onda de la señal transmitida, se clasifican en radar de onda continua y radar de onda pulsada. Según (Canelo & Quiñones, 2015) los radares de onda continua actualmente se utilizan en varias aplicaciones debido al bajo consumo de energía eléctrica con una menor complejidad en el diseño y la implementación en comparación con un radar de onda pulsada. Por este motivo, en el presente trabajo se realiza un extenso análisis del radar de onda continua para luego ser diseñado e implementado.

Los sistemas de radar de onda continua (CW) transmiten una señal electromagnética con modulación FMCW y simultáneamente reciben las señales reflejadas dispersadas por objetos. Los sistemas de radar CW se utilizan generalmente en aplicaciones de bajo costo y compactas de corto alcance. Si un objeto iluminado está detenido, la frecuencia de la señal de eco no cambia con respecto a la transmitida. Sin embargo, si un objeto se está moviendo,

entonces la frecuencia de la señal de eco se altera debido al Efecto Doppler (Melvin & Scheer, 2013).

Figura 2

Radar de onda continua (CW) usando efecto doppler



Nota. El Efecto Doppler, en el que se basa el radar CW simple, es causado por el movimiento relativo de un objetivo, produciendo un aparente cambio de frecuencia de la señal transmitida con respecto a la fuente, a partir de la señal reflejada se puede calcular la velocidad del objetivo v .

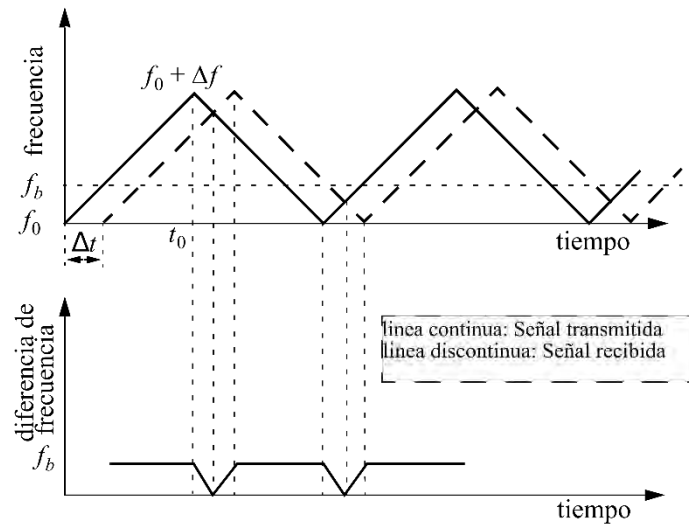
Una desventaja del radar CW es que le resulta difícil para detectar objetos estacionarios, por consiguiente, es difícil medir la distancia entre el transmisor y el objetivo, además el radar es sensible a interferencias. Estas limitaciones se pueden superar modulando la señal de transmisión, por ejemplo, la frecuencia de transmisión puede ser modificada linealmente en función del tiempo. Este tipo de radar se conoce como radar de onda continua modulada en frecuencia lineal (FMCW). Por este motivo en el presente trabajo se decide implementar radar FMCW para medir distancias.

2.2.1. Radar FMCW

En la Figura 3, se muestra una forma de onda triangular FMCW, cabe mencionar que la modulación puede tener cualquier forma de onda, como, por ejemplo: diente de sierra, sinusoidal o triangular.

Figura 3

Modulación lineal en frecuencia de una onda triangular para un objetivo estacionario



Nota. La diferencia de frecuencia, se define como generación de una nueva frecuencia generado por la mezcla de la señal transmitida y la señal recibida (debido al heterodino). La línea discontinua representa la forma de onda de retorno desde un objetivo estacionario a distancia. El retraso de tiempo Δt , es una medida del rango objetivo, como se define en la ecuación (1). Adaptado de transmitted and received triangular LFM signals and beat frequency for stationary target (pag. 139), por Bassem R Mahafza, 2022, CRC Press.

El rango, R a un objetivo detectado puede determinarse en función del tiempo de retraso, Δt , entre la señal transmitida y señal recibida a la velocidad de la luz, el factor 2 es debido a la distancia de ida y retorno (Richars, Scheer, & Holm, 2010).

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz en metros por segundo ($c=3 \times 10^8$ m/s) Δt es el tiempo en segundos y R es la distancia hasta el objetivo en metros.

La frecuencia de modulación f_m es equivalente a:

$$f_m = \frac{1}{2t_0} \quad (2)$$

De (Melvin & Scheer, 2013), se puede obtener una relación entre el ancho de banda de modulación Δf y t_0 , la diferencia de frecuencia f_b y el tiempo de retraso Δ_t

$$\frac{f_b}{\Delta_t} = \frac{\Delta f}{t_0} \quad (3)$$

Remplazando Δ_t y t_0 en (3) se obtiene la diferencia de frecuencia f_b ;

$$f_b = \frac{4Rf_m\Delta f}{c} \quad (4)$$

En la práctica, elegir los parámetros de forma de onda FMCW requiere cuidadosa consideración de numerosas compensaciones (Melvin & Scheer, 2013). Estas compensaciones son necesarias para garantizar que las mediciones se puedan realizar con precisión. Los parámetros importantes son, el ancho de banda de modulación Δf , periodo de modulación t_m y la diferencia de frecuencia f_b . Reducir el ancho de banda de modulación, reduciría el ancho de banda de todos los componentes, por ende, podría funcionar con componentes más simples, reduciendo los costos. Sin embargo, reducir el ancho de banda afectaría, la resolución en rango, además, disminuir el periodo de modulación aumentará la pendiente de la modulación tanto como la magnitud de la diferencia de frecuencia.

2.2.2. Señal Chirp

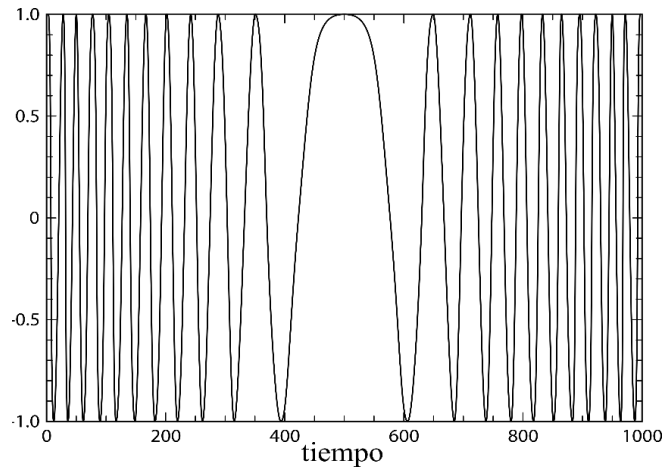
Según (Hein, 2004), la señal lineal FMCW también se conoce como señal chirp, en su forma simplificada se muestra en la siguiente ecuación.

$$S_t = e^{j\pi k_r t^2} \quad (5)$$

Donde: k_r es la tasa de modulación y t_m periodo de modulación.

$$k_r = \frac{\Delta f}{2t_m} \quad (6)$$

Figura 4
Señal Chirp



Nota. Se muestra el gráfico de la señal chirp en el dominio del tiempo para una modulación triangular. En el eje de las abscisas o coordenada horizontal, se muestra el tiempo en microsegundos y el eje de las ordenadas o vertical la amplitud de la señal. Adaptado de equivalent lowpass chirp (pag. 25), (Hein, 2004).

2.2.3. Resolución en Rango

Un parámetro importante para el diseño de sistemas de radar es la resolución en rango. Es la distancia mínima entre dos objetos la cual permite distinguirlos como objetos diferentes. La resolución del rango Δ_r de un radar FMCW es dependiente del ancho de banda de transmisión, además también tendrá límites impuestos por la superposición de forma de onda de transmisión y recepción.

$$\Delta_r = \frac{c}{2\Delta f} \quad (7)$$

2.2.4. Frecuencias de Operación del Radar

La frecuencia de operación del radar se escoge en función de una serie de consideraciones, aplicaciones o características requeridas. El espectro electromagnético está compuesto por bandas de frecuencias con características específicas y particulares que tienen aplicaciones en radio, tv, radares, microondas, antenas, etc.

Tabla 3

Banda de frecuencias para diferentes aplicaciones

Frecuencia	Rango	Ejemplos de aplicación
Alta frecuencia (HF)	3-30 MHz	Georadar, radar de vigilancia de largo alcance.
Muy alta frecuencia (VHF)	30-300 MHz	Radar de penetración terrestre y follaje.
Ultra alta frecuencia (UHF)	300-1000 MHz	Radar de penetración de follaje (FOPEN radar), radar de vigilancia área, radar de defensa antimisiles de largo alcance.
Banda- L	1000-2000 MHz	Radar de localización de armas, radar de vigilancia de largo alcance, radar de control de tráfico aéreo. Aplicaciones forestales
Banda- S	2000-4000 MHz	Radar de localización de armas, radar meteorológico, aplicaciones forestales
Banda- C	4000-8000 MHz	Radar meteorológico, aplicaciones forestales
Banda- X	8000-12000 MHz	Radar de control de fuego, radar de interceptor de aire, radar de mapeo en tierra, radar de seguimiento de misiles balísticos
Banda- Ku	12000-18000 MHz	
Banda- K	18000-27000 MHz	Limitado debido a la absorción

Banda- Ka	27000-40000 MHz	Buscador de misiles, radar de control de fuego de corto alcance
Ondas milimétricas	40000-300000MHz	Radar de control de fuegos, radar automotriz, escáneres aeroportuarios.

Nota. Esta tabla muestra las frecuencias de trabajo y algunas aplicaciones

Las frecuencias ubicadas en las bandas VHF, UHF y L tienen aplicaciones en radares meteorológicos, radares de control de tráfico aéreo (ATC), radares de vigilancia marítima y terrestre. Las frecuencias ubicadas en la banda L se utilizan generalmente en radares de penetración terrestre y radares de baja altitud utilizado en vigilancia costera y fronteras de países. Por otro lado, las frecuencias ubicadas en las bandas C y X se utilizan para obtener imágenes y controlar el fuego. Finalmente, las frecuencias L, S, C se pueden usar para aplicaciones forestales.

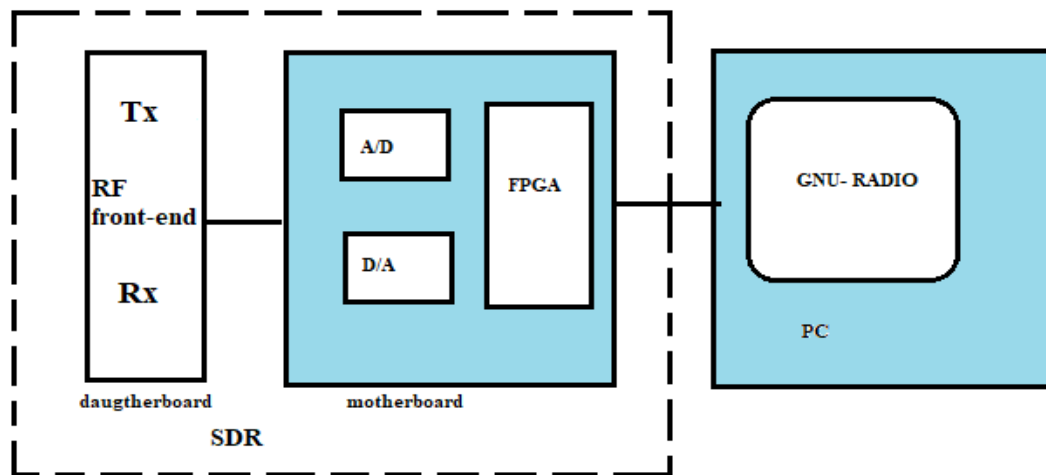
Debido a que se desea que las señales sean reflejadas por la copa del árbol en este trabajo se implementará en la banda S, específicamente en la frecuencia de 2.1 GHZ.

2.3. Radio definido por software o SDR

Es un sistema de radio comunicaciones donde los componentes típicamente utilizados como amplificadores, multiplicadores, filtros, moduladores demoduladores, son remplazados e implantados en software. Es decir, todas las señales que se generen son muestreadas como señales digitales. Usando conversor digital a analógico (DAC) se pueda transmitir al medio, de igual manera en el receptor utilizando ADC se captura y demodula la señal, usando el software GNU Radio.

2.3.1. Universal Software Radio Peripheral (USRP)

El Universal Software Radio Peripheral (USRP) es básicamente un periférico del fabricante Ettus Research que está fabricado para trabajar con un procesador externo (PC).

Figura 5*Diagrama básico del USRP***Fuente:** Elaboración propia.

El USRP consta de 2 tarjetas, una tarjeta principal (motherboard) y tarjeta secundaria (daughterboard). La tarjeta principal que consta de un FPGA permite el procesamiento. En la tarjeta principal o motherboard, se produce la conversión A/D y D/A respectivamente y en la FPGA se realiza un procesamiento de la señal digital. En el RF front-end se realiza la transmisión y recepción de señales.

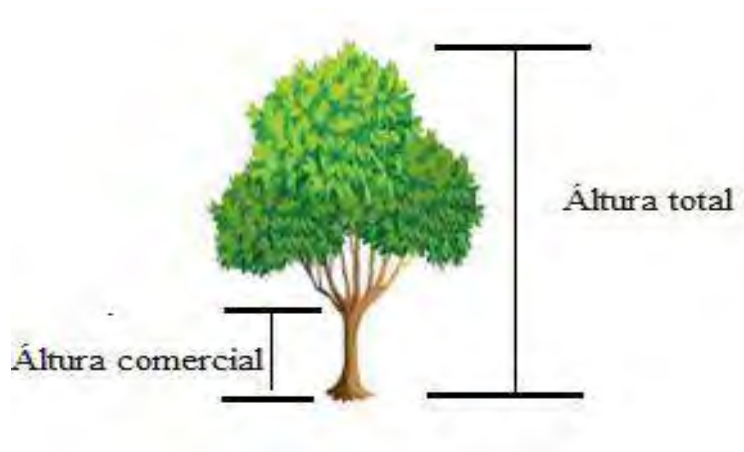
2.4. Altura de los Árboles

Los árboles tienen la capacidad de almacenar CO₂ a través de la fotosíntesis, es decir durante todo su crecimiento capturan dióxido de carbono. Por este motivo los árboles se denominan sumideros de carbono. Para poder determinar cuánto de biomasa y cuánto de dióxido absorben los bosques, es necesario tener el volumen de los árboles. Para esto se requiere medir la altura y diámetro.

De acuerdo a (Masías, 2017) existen tres tipos de altura del árbol los cuales son: altura total, altura de fuste y la altura comercial. La altura total es la distancia vertical entre la superficie y la copa de un árbol, teniendo en cuenta que en esta tesis se medirá la altura total.

Figura 6

Tipos de altura de los árboles



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

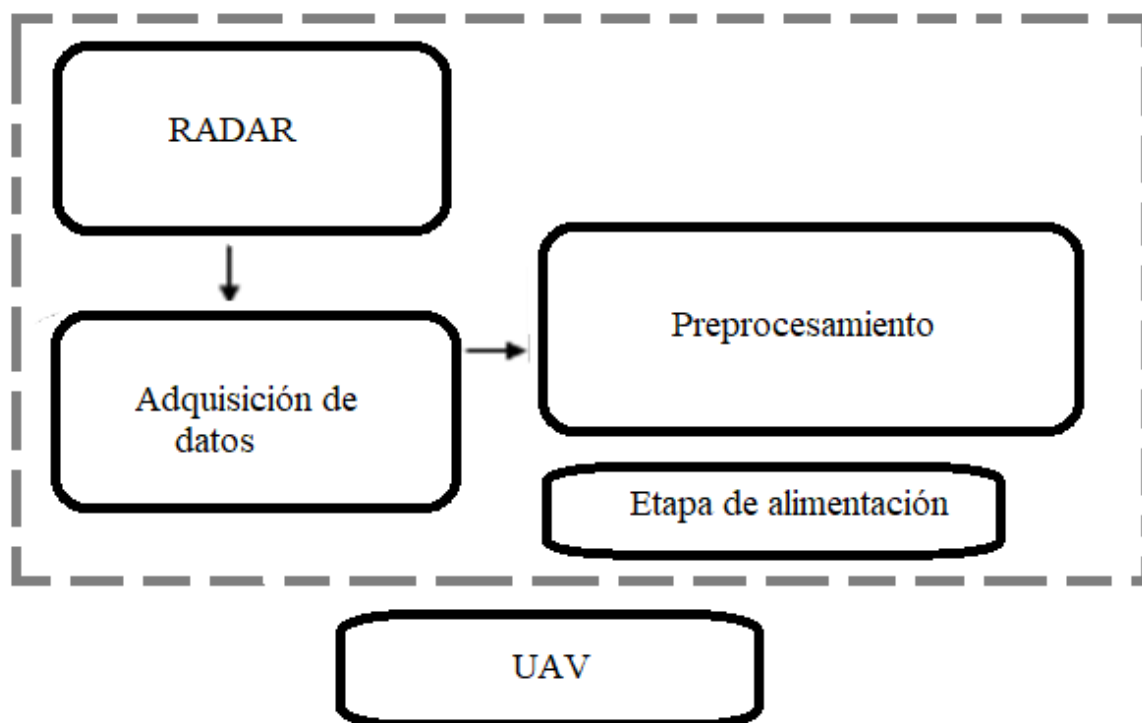
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.1. Diagrama de Bloques del Sistema

En el presente capítulo se detalla el diseño e implementación de todo el sistema que permitirá medir la altura forestal. También se describe el proceso de montaje en el vehículo aéreo y se muestra el diagrama de todo el sistema con los requerimientos necesarios.

Figura 7

Diagrama de bloques del sistema



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de bloques del sistema consta de 5 etapas, un radar, adquisición de datos, preprocesamiento. El radar está compuesto por un equipo que se tiene en el laboratorio de Telecomunicaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, el cual tiene la capacidad de transmitir y recibir las señales deseadas. Además, contiene una antena para la

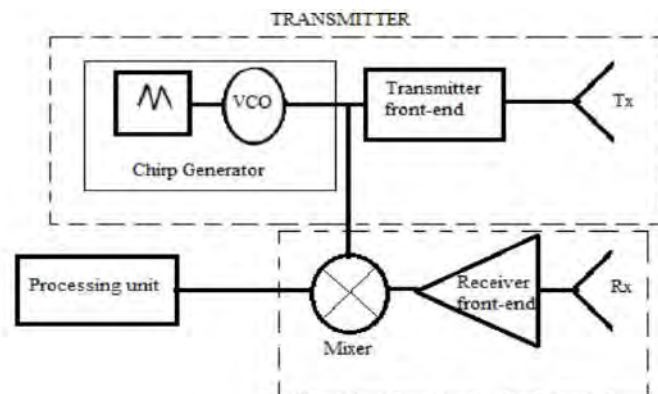
transmisión y otra antena para recepción. La adquisición de datos, consta de un ordenador que pueda ser transportado y donde se pueda instalar el software para el control del radar, y almacenamiento de datos. Para el procesamiento se necesitará usar el software Matlab, para esto se requerirá una PC. Finalmente, para que todo el sistema pueda adquirir datos en vuelo se necesita ser montado en un dron y que todo el sistema tenga autonomía para esto es necesario implementar la etapa de alimentación.

3.2. Diseño e Implementación del Radar

El radar constará de 3 partes, equipo que pueda funcionar como radar, antenas para la transmisión y recepción. Por último, la etapa del diseño e implementación del radar FMCW en software.

Figura 8

Diagrama de bloques del radar FMCW



Nota. Adaptado Radar kit block diagram (pag. 140), por Gregory L. Charvat, Alan J. Fenn, and Bradley T. Perry, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

Para poder implementar un radar FMCW se requiere un equipo donde se pueda diseñar el diagrama mostrado en la Figura 8, asimismo el equipo deberá tener un puerto para colocar una antena transmisora y un puerto para la antena receptora. A continuación, se detalla las características que debe cumplir el equipo para que pueda funcionar como radar.

3.2.1. Selección de equipo como radar

Para la selección de equipo como radar se tuvo en cuenta los equipos que se encuentran en el laboratorio de telecomunicaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica - UNSAAC, teniendo los siguientes requerimientos:

- Peso menor a 4 Kg.
- Frecuencia de operación mayor a 2 GHz.
- Mayor Ancho de banda.
- Puerto para Tx, Puerto para Rx

En el laboratorio se cuenta con dos equipos que cumplen con los requerimientos necesarios de implementación de un radar FMCW, tales como: Analizador Vectorial de Redes o VNA (Vector Network Analyzer) y USRP (Universal Software Radio Peripheral).

Figura 9

Analizador Vectorial de Redes N9914A



Nota. Adaptado de N9914A FieldFox Handheld RF Analyzer, por Keysight Technologies 2000–2023.

En la figura 9, se tiene un analizador vectorial de redes portátil de la familia FieldFox modelo N9914A que es utilizado en radiofrecuencia (RF) y microondas, es decir, es utilizado para analizar las propiedades eléctricas de dispositivos, componentes, cable, antena y sistemas de comunicaciones. Se cuenta con un trabajo hecho por (Herrold, 2013), trabajo que tiene como objetivo realizar mediciones de radar de penetración de hielo utilizando VNA.

Por otra parte, el otro equipo tomado en cuenta que cumple las exigencias, es el USRP NI 2920. Cabe mencionar que existen algunos trabajos desarrollados los que en los cuales se usa la tarjeta USRP como radar, en aplicaciones topográficas (Merchán, 2016) y aplicaciones de vigilancia meteorológica (Prabaswara, Munir, & Bayu, 2011) etc.

Figura 10

USRP 2920



Nota. Adaptado de USRP-2920, por NATIONAL INSTRUMENTS

Tabla 4*Comparación entre equipos para selección de radar*

Equipo	VNA 9914a	USRP 2920
Peso	3 Kg	1.19 Kg
Frecuencia de operación	30 kHz – 6.5 GHz	50MHz – 2.2GHz
Ancho de banda	10 MHz	40 MHz
Alimentación	Batería interna recargable	Fuente externa 5V, 3 A, DC
Precio	S/ 60000	S/ 20000

Nota. El VNA 9914a cuenta con una batería interna la cual es recargable y tiene una duración de alrededor de 3.5 horas. Los datos fueron tomados de (Keysight, 2019) y (NI, 2020).

Ambos equipos cumplen con los requerimientos necesarios, y tomando en cuenta el ancho de banda 40 MHz que es un parámetro muy importante para el diseño de radar FMCW, por este motivo se eligió el USRP 2920, adicionalmente otra característica que nos hace elegir este equipo es el peso, pues nos permite añadir al sistema algunos componentes que se requieran considerando el peso máximo de carga del drone.

El modelo NI 2920 es un instrumento utilizado en aplicaciones de baja potencia que tiene la capacidad de transmisión y recepción, lo cual permite diseñar, crear e implementar sistemas de comunicación inalámbrica con SDR (radio definida por software) en el campo de la educación y la investigación. Este dispositivo USRP NI2920 posee una entrada Gigabit Ethernet para comunicarse con el ordenador, además es compatible con MATLAB, GNU Radio y LabVIEW.

Tabla 5*Características del dispositivo USRP 2920*

Transmisión	Recepción
Rango de frecuencia: 50 MHz – 2.2G Hz	Rango de frecuencia: 50 MHz – 2.2GHz
Rango de ganancia: 0-31 dB	Rango de ganancia: 0-31.5 dB
Máximo ancho de banda: 40 MHz (tiempo real)	Máximo ancho de banda: 40 MHz (tiempo real)
Velocidad máxima de muestro I/Q, 1 canal 25MS/s, 2 canales 50 MS/s	Velocidad máxima de muestro I/Q, 1 canal 25MS/s, 2 canales 50 MS/s

Nota. Datos extraídos de (NI, 2020)

Figura 11*Panel frontal NI USRP 2920*

Nota. Los puertos Tx1/Rx1 y Tx1/Rx1 permiten configurarse como transmisores o receptores, en cambio los puertos Rx2 y Rx2 solo pueden ser configurados como receptores. Adaptado de NI USRP 2920, por NATIONAL INSTRUMENTS.

La parte enmarcada en rojo de la Figura 11 se muestran los indicadores led.

- Led A: indica el estado de transmisión del dispositivo. Si alumbra verde está transmitiendo. Si está apagado no está transmitiendo.

- Led B: indica estado del enlace MIMO (múltiples entradas/múltiples salidas, por sus siglas en inglés). Si alumbra verde los dispositivos están conectados mediante el cable MIMO. Si está apagado los dispositivos no están conectados mediante el cable MIMO.
- Led C: indica el estado de recepción del dispositivo. Si alumbra verde está recibiendo datos. Si está apagado no está recibiendo datos.
- Led D: indica el estado del firmware del dispositivo. Si alumbra verde el firmware está cargado. Si esta apagado el firmware no está cargado.

Los indicadores led nos ayuda a identificar en qué estado está nuestra tarjeta. Como se quiere que el sistema de radar funcione como radar biestático el Led A y Led C siempre deberán estar encendidos.

La parte enmarcada en negro de la Figura 11 tiene las conexiones externas, a continuación, se muestra la Tabla 6 con la información de alimentación respectiva.

Tabla 6

Conexiones externas del dispositivo USRP 2920

ID del componente	Descripción del componente	Detalles
Ethernet	Conexión Ethernet	Gigabit Ethernet -Max potencia de salida 15 dBm-20dBm. -Rango de ganancia de potencia
Tx, Rx1	Transmisor y receptor	0-31 dB.

		-Ancho de Banda instantáneo
		20 MHz (16 bit)
		40 MHz (8bit)
Rx2	Receptor	-Ancho de Banda instantáneo
		20 MHz (16 bit)
		40 MHz (8bit)

Fuente: Elaboración propia.

El puerto gigabit Ethernet permite mayor transmisión de datos, lo que aumenta el ancho de banda de la señal transmitida. El puerto Tx, Rx1 puede ser usado como transmisor y receptor, sin embargo, en este trabajo será usado solamente como transmisor.

En el puerto Tx, Rx1 se coloca la antena transmisora, de igual manera se coloca en el puerto Rx2 la Antena receptora.

3.2.2. Selección de antenas

Para la selección de antena es muy importante considerar, las siguientes características:

- Peso menor posible.
- Ganancia.
- Mayor Ancho de banda.

Se consideraron 2 tipos de antenas Vivaldi y Bocina.

Figura 12*Antena Bocina***Fuente:** Elaboración propia.

Las antenas tipo bocina se clasifican de acuerdo a la rugosidad de la superficie que la define, esto permite tener un mejor patrón de radiación y sobre todo mayor ganancia.

Figura 13*Antena Vivaldi***Fuente:** Elaboración propia.

Antena Vivaldi es una antena plana que destaca por tener un gran ancho de banda además son útiles para cualquier frecuencia, ya que todas las antenas tienen un tamaño escalable para su uso en cualquier frecuencia.

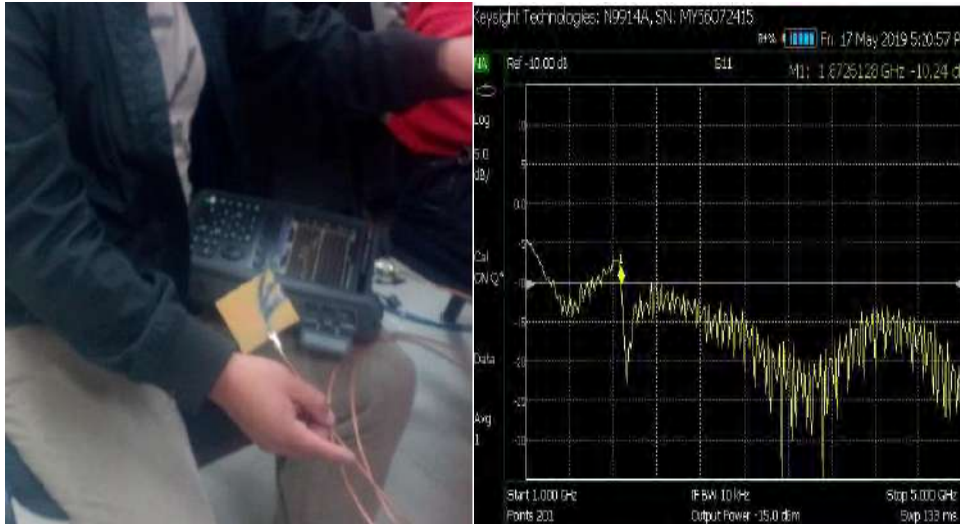
Tabla 7*Comparación de características para elección de antena.*

Equipo	Antena Vivaldi	Antena Bocina
Peso	80 g	1.5 Kg
Ancho de Banda	1.9 GHz – 6 GHz	2.2 GHz – 2.4GHz
Impedancia	50 ohm	50 ohm
Ganancia	7 dB	15 dB
Precio	S/ 500	S/ 1500

De ambas antenas se eligió la antena Vivaldi principalmente debido a que tiene mayor ancho de banda lo cual es muy importante para la transmisión de la señal con un barrido de frecuencias. Además otro parámetro importante que nos hace elegir la antena Vivaldi es el peso dado que se usará una antena para la transmisión y otra para la recepción, en ambas antenas se tendrá un peso total de 160 g.

Figura 14

Medición de parámetros S11 de la antena Vivaldi utilizando VNA914



Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de reflexión S11 indica cómo se adapta la antena con la línea de transmisión, este parámetro determina el ancho de banda de la antena. Para la medición del parámetro S11 se usó el Analizador de redes vectoriales VNA, cable con conector tipo N y conector SMA. El rango de frecuencias sobre el cual el coeficiente de reflexión de la antena es -10 dB o menos es el ancho de banda. Se visualiza que el ancho de banda de la antena inicia en 1.9 GHz. Lo que nos permite trabajar en 2.1 GHz.

3.2.3. Implementación de la etapa de transmisión y recepción.

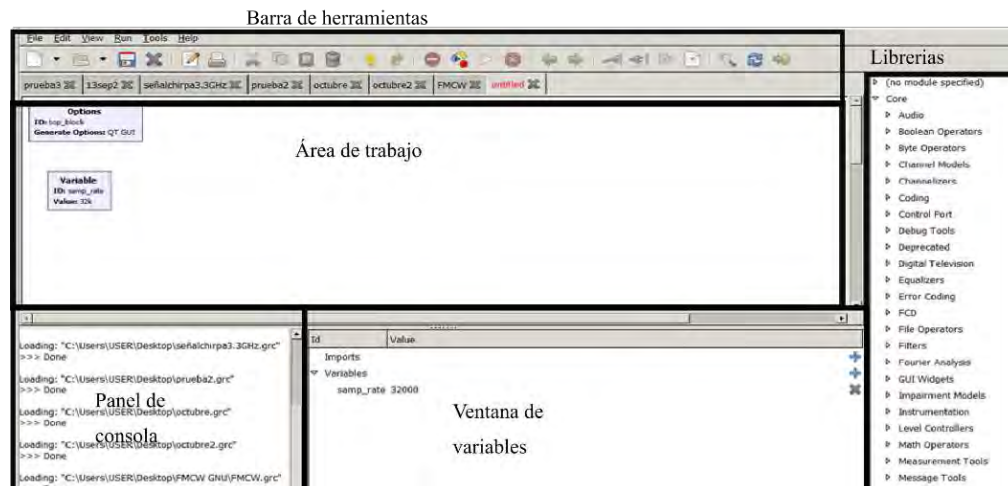
Como se mencionó en el anterior capítulo el radar a implementar es radar FMCW de onda continua con modulación en frecuencia lineal esta descrito por la Figura 8, donde se observa un generador de la señal chirp y el transmisor de la señal chirp. Por otro lado, el receptor capta las señales chirp que tienen la información distancia que son multiplicados por la señal chirp original, es decir pasan por un proceso de demodulación.

La interfaz de GNU Radio proporciona herramientas y bloques con librerías para la generación de señales con características adecuadas a la aplicación a desarrollar.

3.2.3.1. Implementación de la Etapa de transmisión

Figura 15

Interfaz GNU Radio Companion



Nota. En la interfaz de GNU Radio, se tiene: una barra de herramientas, área de trabajo, librerías, panel de consola, ventana de variables.

GNU Radio es una plataforma versátil utilizada en varias aplicaciones de sistema de comunicación, redes, radio cognitiva, radio afición y se puede trabajar o desarrollar en diferentes sistemas operativos como en Windows, Linux (Ubuntu, Fedora, Raspbian). La interfaz de usuario de GNU Radio es bastante agradable e intuitiva, y se utiliza mediante la conexión de bloques configurando adecuadamente y según la aplicación requerida, es decir, los usuarios se encargan de conectar los bloques dependiendo de la aplicación que se quiera construir.

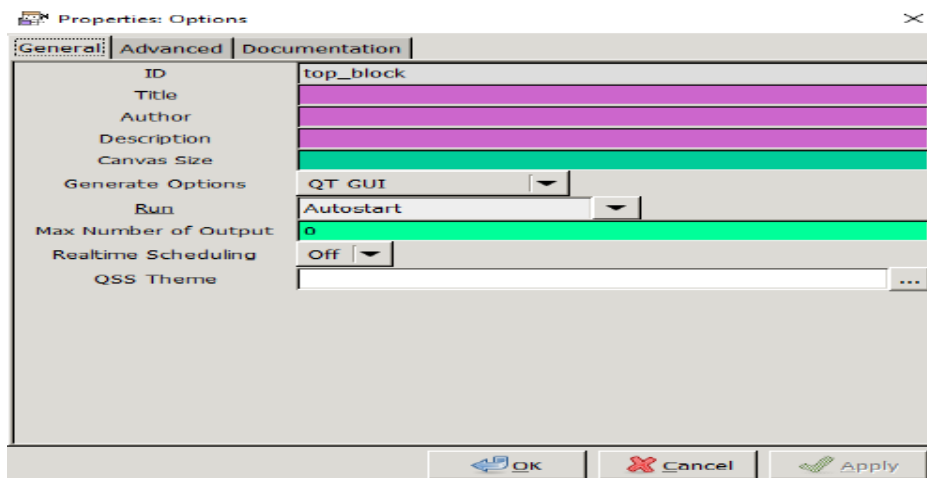
Además, también podría usarse sin hardware llegando a un nivel de simulación. GNU Radio permite desarrollar aplicaciones a través de una interfaz de GNU Radio Companion mediante C++ y Python.

En el programa GNU Radio, al iniciar un proyecto por defecto aparecerá un bloque llamado “Properties: Options” con sus respectivas propiedades como se muestran en la Figura 15 y Figura 16, donde permite colocar un título del proyecto, el autor, una descripción del proyecto y las dimensiones del área de trabajo, y si desea crear y personalizar bloques se tiene las siguientes opciones: WX GUI, QT GUI y Hierblock. Dentro del bloque incluso se pueden ver 3 pestañas donde explica la documentación y descripción del bloque mostrando parámetros del código del bloque.

En la implementación de un sistema de radar basado en USRP y GNU radio se tiene los tipos de variables, los cuales son: enteros, flotantes, complejos, bits, etc. Las herramientas WX y QT, se utilizan para crear interfaces gráficas y observar las señales transmitidas y recibidas o retrodispersadas por el objeto reflectante, y se puede visualizar la forma de onda en tiempo real.

Figura 16

Bloque “Properties: Options”



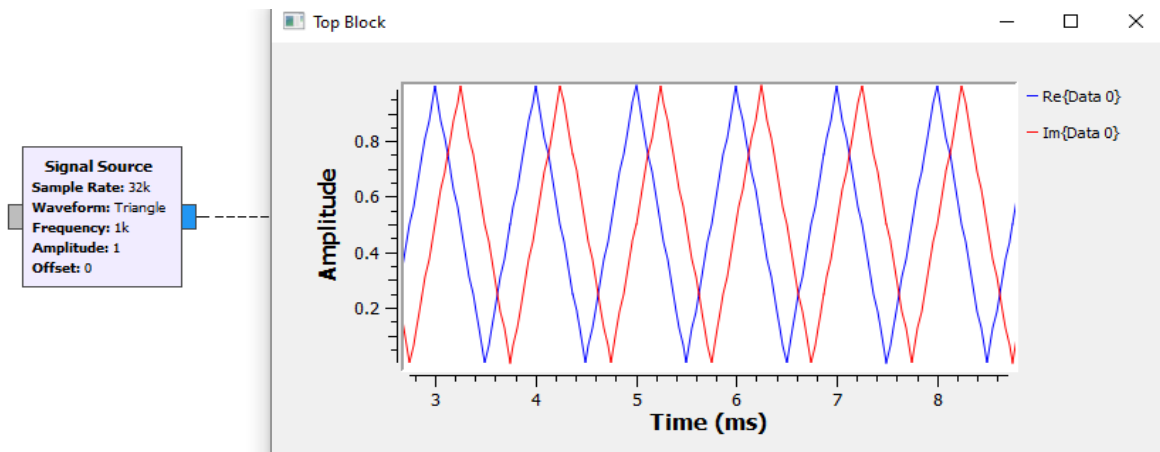
La creación de interfaces de usuario en SDR se realiza mediante la herramienta de WX GUI, además dichas herramientas permiten visualizar señales, espectrogramas, histogramas y constelaciones en tiempo real, sin embargo, las herramientas de WX GUI

consumen más energía que la herramienta QT GUI (Selva, Reis, Lenzi, Meloni, & Barbin, 2012).

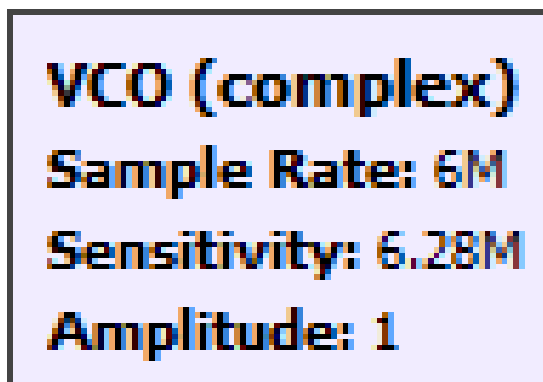
En la implementación de transmisor y receptor de señales chirp en el radar FMCW, se utilizan los siguientes bloques: WX GUI Scope Sink, WX GUI FFT Sink y WX GUI Waterfall Sink que tienen las funcionalidades de observar la señal chirp en el tiempo, en el dominio de la frecuencia y el rango en que se transmite la señal chirp respectivamente.

Las herramientas QT GUI presentan más herramientas para visualización que WX GUI debido a que se pueden observar las señales chirp en tiempo real. Por ejemplo, en QT GUI Frequency Sink cumple la misma función que WX FFT basado en la biblioteca wx Widgets que son utilizados para determinar y visualizar la transformada rápida de Fourier o espectro de la señal.

El valor de la frecuencia de muestreo real utilizado puede ser de diferentes valores en cada bloque. Sin embargo, es preferible usar el mismo valor en todo el diagrama para que todo sea consistente operando en el mismo dominio de frecuencia de muestreo.

Figura 17*Bloque “Signal Source”***Fuente:** Elaboración propia.

El bloque “Signal Source” nos permite elegir la forma de onda, se puede elegir una señal senoidal, constante, cuadrada, diente de sierra. La cual generará la Señal Chirp, la señal que se elige es una forma triangular de tal forma que esta señal sea la entrada del VCO y a la salida del VCO sea una señal cuya frecuencia inicie en 2099.5MHz hasta 2100.5MHz.

Figura 18*Bloque “VCO (Complex)”***Fuente:** Elaboración propia.

El bloque “VCO (Complex)” produce una forma de onda senoidal que dependerá de la amplitud de entrada, la sensibilidad del VCO nos permite establecer el ancho de banda de la señal a transmitir que se determina de la siguiente forma:

$$\text{Sensitivity} = 2 * 3.1415 * Bw = 2 * 3.1415 * 1\text{Mhz}$$

$$\text{Sensitivity} = 6.28\text{rad/seg.}$$

Figura 19

Bloque "Throttle"

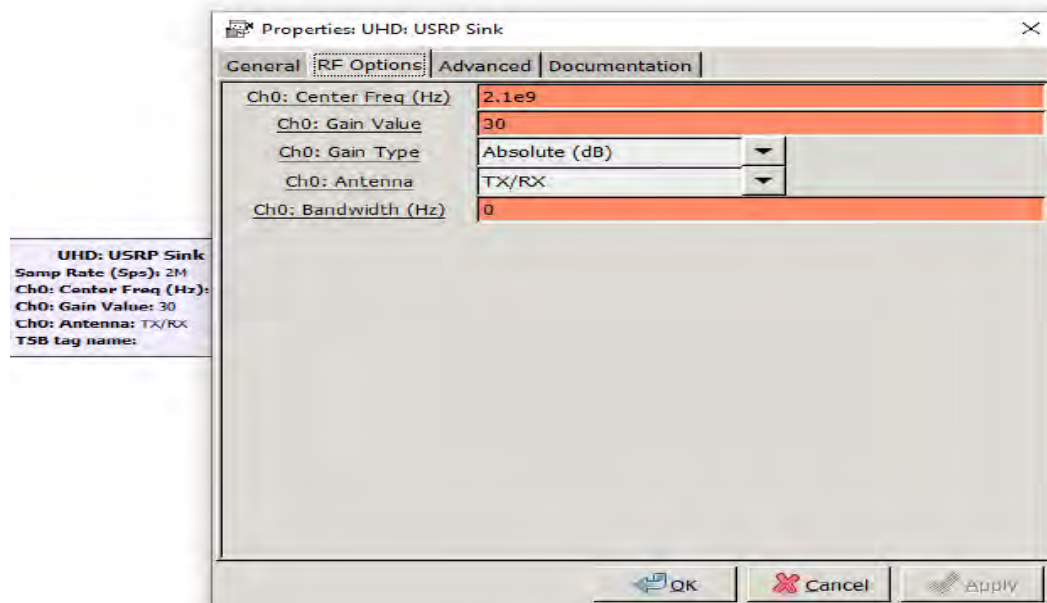


Fuente: Elaboración propia.

El bloque "Throttle" por lo general se conecta directamente a la salida de un bloque de origen, por ejemplo, Signal Source, VCO etc. Esto para limitar la velocidad a la que ese bloque de origen crea muestras. Si no se coloca este bloque las salidas no presentaran ningún cambio, pero se estaría usando el CPU al 100% y en algún momento podría fallar el software GNU radio.

Figura 20

Bloque "UHD: USRP Sink"

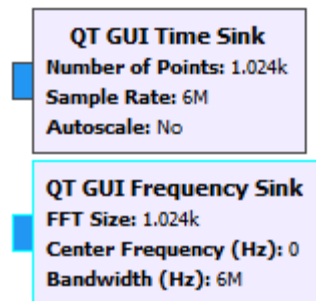


Fuente: Elaboración propia.

El bloque “UHD: USRP Sink” nos permite transmitir muestras de un dispositivo USRP hacia el medio, es decir este bloque actúa como transmisor. Es importante ajustar los parámetros como frecuencia central, ganancia, en la opción Ch0: Antena elegir el puerto Tx/Rx el que será usado como transmisor.

Figura 21 Sin

Bloque “QT GUI Time Sink” “QT GUI Frequency k”

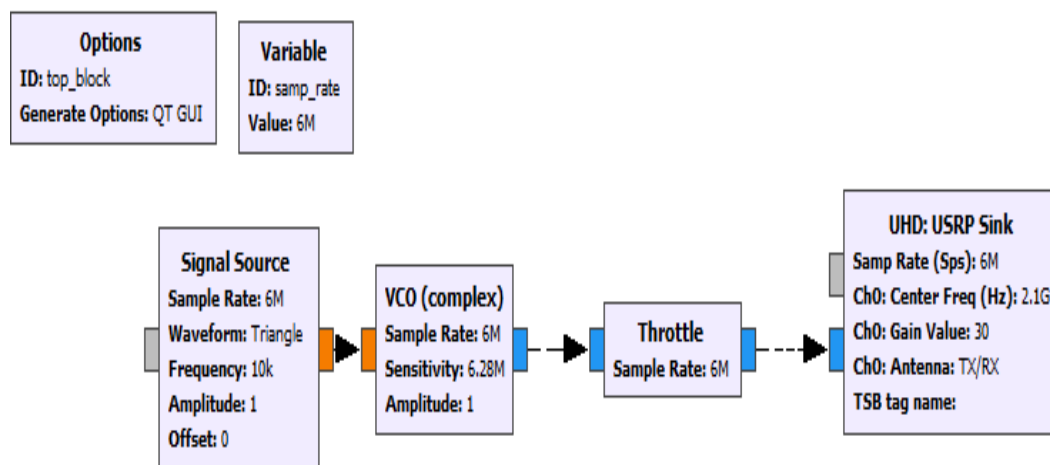


Fuente: Elaboración propia.

El bloque “QT GUI Time Sink” nos permite ver la respuesta en el tiempo y el bloque “QT GUI frequency Sink” nos permite ver la respuesta en frecuencia.

Figura 22

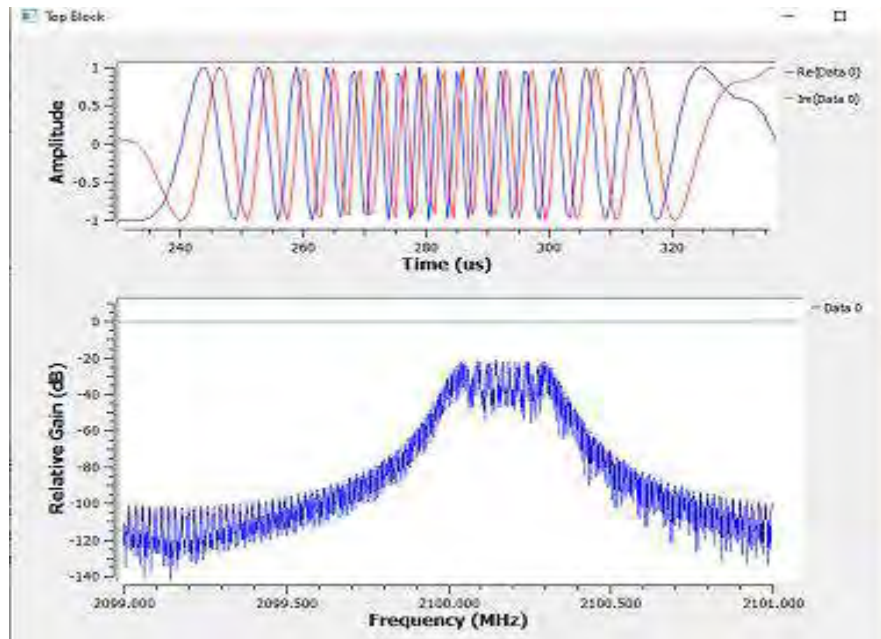
Diagrama de la etapa de transmisión



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23

Respuesta en el dominio del tiempo y respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal chirp que será transmitida.



Fuente: Elaboración propia.

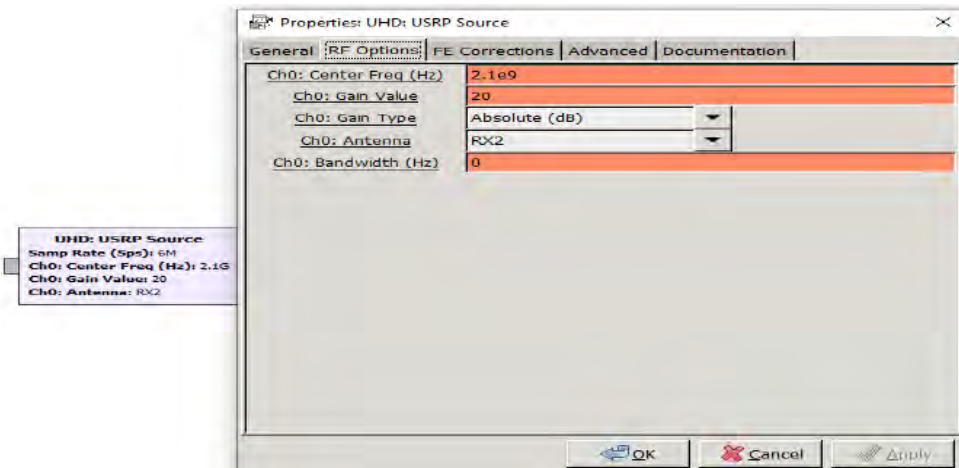
La Figura 23 nos muestra dos gráficos, una respuesta en el tiempo y una respuesta en la frecuencia, en ambos gráficos se visualizan la señal chirp que será transmitida. Se puede ver que el gráfico de las respuestas en frecuencia está centrado en 2.1GHz con un ancho de banda de 1Mhz.

3.2.3.2. Implementación de la Etapa de recepción

Para la etapa de recepción únicamente se necesita la utilización del bloque “UHD. USRP Source” en la que se ajustan los parámetros de frecuencia central, ganancia, en Ch0 elegir el puerto RX2 donde se colocará la antena receptora. La frecuencia central del bloque UHD Source deberá ser igual al bloque UHD Sink.

Figura 24

Bloque “UHS: USRP Source” para la Recepción.



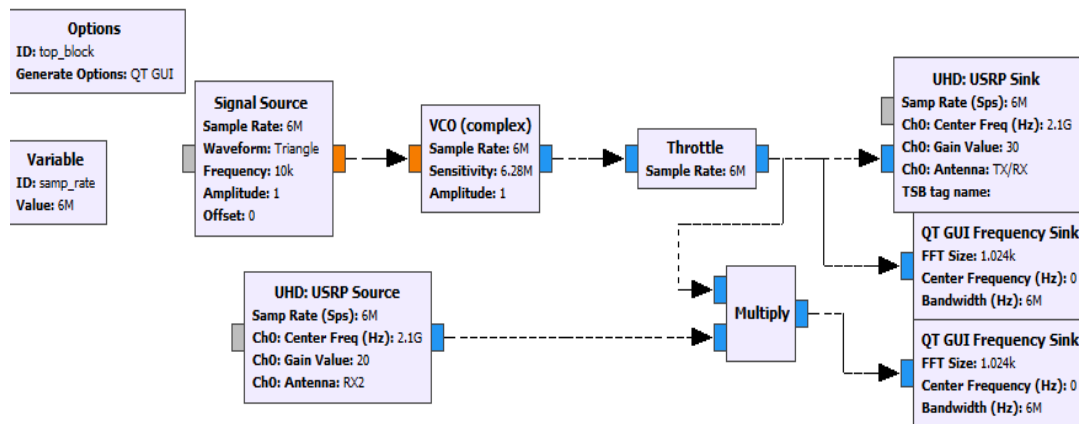
Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de recepción se puede añadir componentes como amplificador, filtros a nivel de software en GNU radio o hardware en el puerto Rx2 del USRP. Sin embargo, la utilización de estos bloques en GNU radio reduce la capacidad de transmisión de datos lo que afecta directamente el ancho de banda de la señal transmitida.

3.2.3.3. Implementación del radar FMCW en GNU radio

Figura 25

Radar FMCW en GNU radio



Fuente: Elaboración propia.

El sistema de la Figura 25 consta de la etapa de transmisión multiplicada por la etapa de recepción esto genera el radar de onda continua de frecuencia modulada (FMCW) lo que permite medir distancias y determinar objetos, este sistema podrá ser implementado en una PC o en la Raspberry Pi 4.

3.3. Diseño e Implementación del Sistema de Adquisición de Datos.

En base al desarrollo y características requeridas del radar FMCW, se tuvo en cuenta la selección del sistema de adquisición de datos con los siguientes requerimientos:

- Portátil.
- Sistema operativo Windows o Linux.
- Mayor velocidad de procesamiento.
- Peso menor a 1 Kg.
- Puerto Gigabit ethernet

Se seleccionó un Raspberry Pi 4 como un sistema de adquisición de datos debido a que cumple con las especificaciones anteriormente mencionadas.

Figura 26
Raspberry Pi 4



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26, se muestra el Raspberry Pi 4 que se usará como sistema de adquisición de datos, además el USRP NI2920 como radar, las antenas deben estar montados a bordo de un vehículo aéreo no tripulado.

3.3.1. Implementación del Sistema Adquisición de Datos

Se implementa el sistema de adquisición de datos usando Raspberry Pi 4 para lo cual se requiere instalar Linux e instalar GNU radio para la captura de las señales retrodispersadas provenientes del árbol, por lo tanto, se descarga la imagen de sistema operativo para Raspberry Pi 4 para ello se requiere instalar el programa Ballena Etcher que es usado para quemar dicha imagen en un micro SD. Luego, se realiza los pasos necesarios para instalar Ubuntu (Linux) e instalar GNU radio cuyos interfaces instalados se muestran en las siguientes, Figura 28 y Figura 29.

Ingresa a la página: <https://ubuntu.com/download/raspberry-pi> para poder descargar la imagen del sistema operativo UBUNTU. Luego, se descarga la imagen del sistema operativo, la cual está certificada para Raspberry Pi2 solamente 32bits, Raspberry Pi 3 (32 bits y 64 bits), Raspberry Pi4 (32 bits y 64 bits), Raspberry Pi 400 (32 bits y 64 bits). El siguiente paso es quemar la imagen en un micro SD, para esto se usará el programa Ballena Etcher.

Ya teniendo la tarjeta micro SD con la imagen, se coloca en la ranura de la Raspberry pi 4 para que pueda iniciar el sistema operativo, se procede a conectar todos los periféricos, alimentación con cable tipo C, cable micro HDMI para conectar el monitor, mouse y teclado como se muestra en la Figura 27.

Figura 27
Raspberry Pi 4 con periféricos



Fuente: Elaboración propia.

- Una vez inicializado el sistema operativo, ingresamos como usuario: Ubuntu y contraseña: Ubuntu, nos pedirá que cambiemos de contraseña.
- Para actualizar el sistema ingresamos el siguiente comando `sudo apt-get update`.
- Para actualizar los paquetes se ingresa el siguiente comando `sudo apt-get upgrade`.
- Se instala la herramienta que nos permitirá tener varios escritorios a la vez:
`sudo apt-get install tasksel`.
- Para abrir lo instalado se ingresa: `sudo tasksel` y aparecerá lo siguiente Figura 28, además se puede seleccionar las aplicaciones que se quieran instalar en el sistema operativo Ubuntu.

Figura 28
Ubuntu (Linux) en Raspberry Pi 4



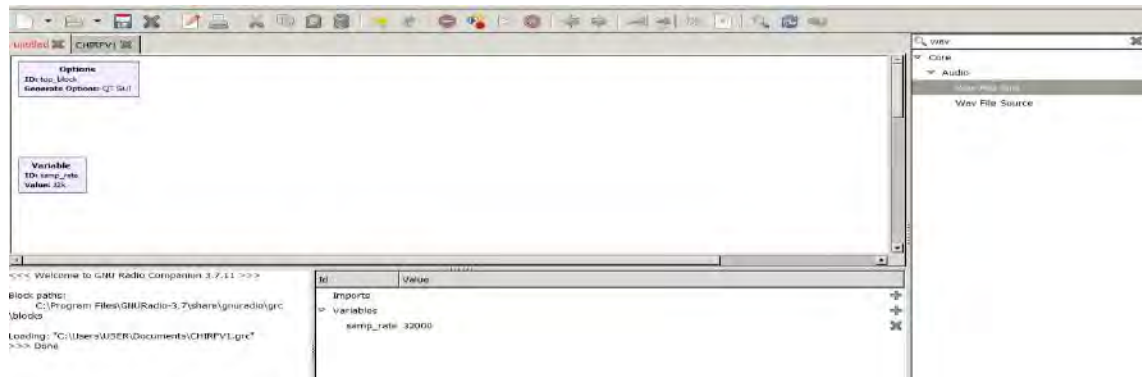
Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber instalado Ubuntu en la Raspberry Pi 4, se procede con la instalación de GNU radio. Cabe mencionar que GNU radio se puede instalar en sistemas operativos como Raspbian y Ubuntu. Como requerimiento mínimo se deberá usar una Raspberry Pi 3B+ con un micro SD de 32 Gb.

Accedemos a la terminal de Ubuntu donde se ingresan lo siguientes comandos para poder instalar GNU para Raspberry pi4

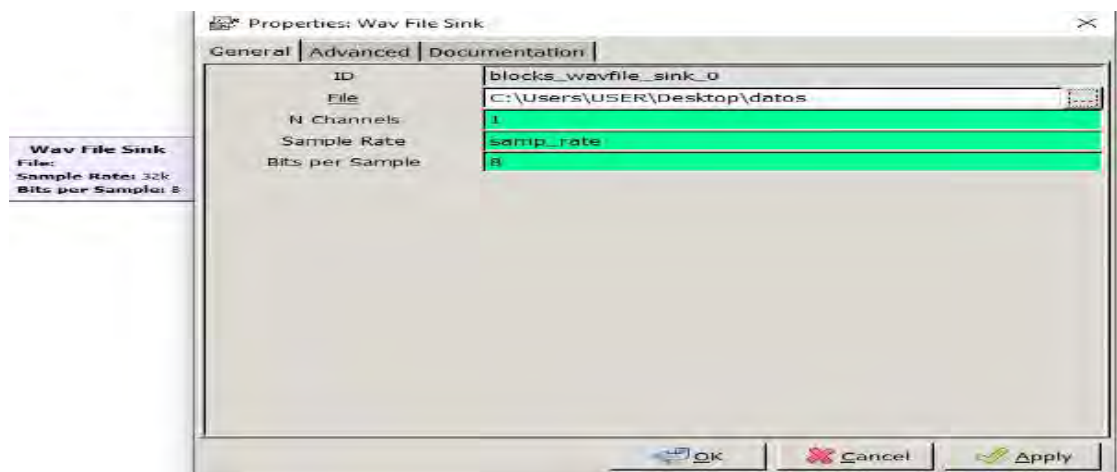
- `sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases`
- `sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases-3.7`
- `sudo apt install gnuradio`

Figura 29
GNU radio en Raspberry Pi 4



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30
Bloque “Wav File Sink”



Fuente: Elaboración propia.

Una vez instalado GNU radio en la Raspberry pi 4, se usa el bloque “Wav File Sink” quien nos permite almacenar toda la señal reflejada del objetivo deseado en formato de audio.

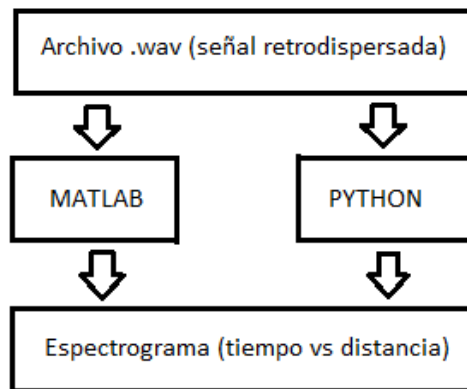
3.4. Diseño e implementación del Preprocesamiento

En esta implementación del sistema de radar FMCW se topó con el procesamiento analógico y digital de señales de radar. El procesamiento analógico viene la parte de demodulación y filtrado de señales portadora que viene reflejada de las copas del árbol. El procesamiento digital de señales de radar FMCW viene a ser la parte de conversión analógico

digital (ADC) y la implementación del algoritmo para determinar el espectrograma para una mejor visualización de las alturas de los árboles se realizará en MATLAB y Python.

Se seleccionó MATLAB para la implementación del algoritmo de preprocesamiento y procesamiento digital de señales porque trabaja con matrices y es bastante utilizado en las universidades y centros de investigación, es decir principalmente en investigación científica. Por otro lado, se realizó pruebas en Python porque el uso de dicho programa está en ascenso y también es bastante utilizado para procesamiento de datos y otros fines. Una descripción general del procesamiento digital sería descrita por la Figura 31, donde las señales retrodispersadas son digitalizadas por un conversor analógico digital (ADC) son guardados en un archivo.wav para posterior procesamiento de datos FMCW y finalmente obtener un espectrograma.

Figura 31
Procesamiento general de señales FMCW



Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Implementación del preprocesamiento de las señales

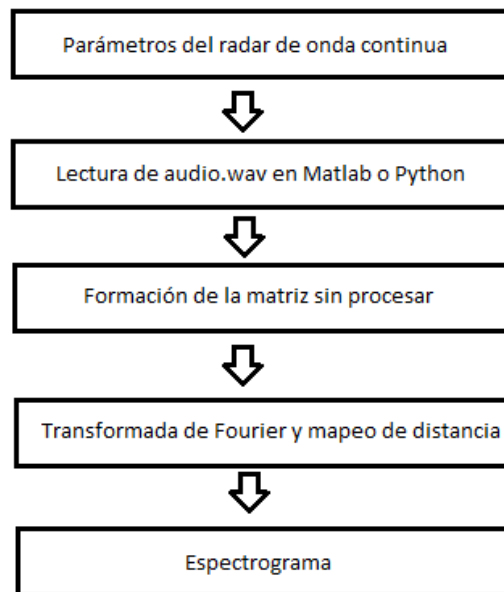
En la Figura 31, se observa el procesamiento de señales de radar de onda continua en frecuencia modulada, para lo cual se toma en cuenta los parámetros como la frecuencia de

operación, ancho de banda, duración de pulso, frecuencia de muestreo y la velocidad de la luz. Luego, se realiza la lectura de audio.wav en Python (pruebas en tierra) y en MATLAB (pruebas con datos capturados en el aire), cabe mencionar que para ambos casos el procesamiento es parecido.

En el procesamiento de señales radar FMCW, primero se manipula el archivo.wav para formar una matriz y aplicar la transformada de Fourier tanto a filas y columnas de dicha matriz mediante el comando `fft2` en MATLAB y luego se realiza el mapeo de distancia o calibración, y finalmente se obtiene el espectrograma.

Figura 32

Preprocesamiento de señales de radar FMCW



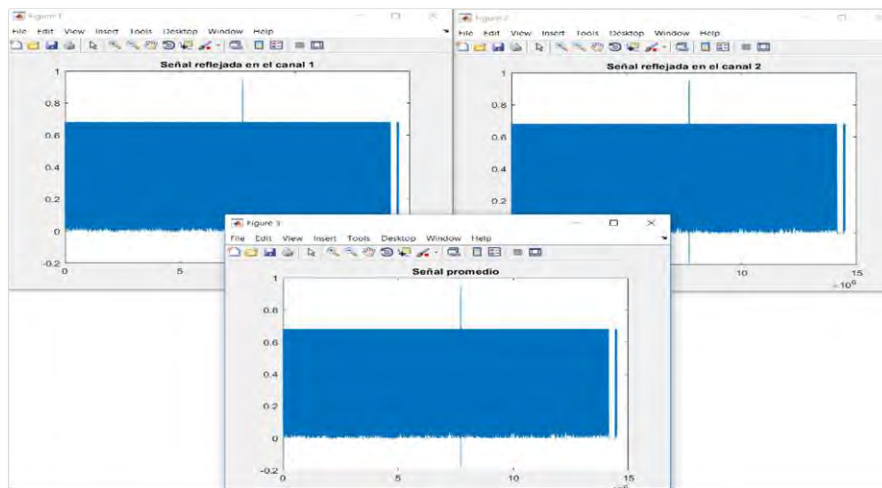
Fuente: Elaboración propia.

Las señales retrodispersadas son señales chirp con un desfase que contiene la información de la distancia vertical, es decir contiene la distancia entre el radar FMCW a bordo del Vehículo Aéreo no Tripulado y los objetos reflectores. Los objetos reflectores se encuentran en el dosel del árbol, dichas señales proveniente de los reflectores son captados

por la antena del radar (USRP 2920), pasando por un proceso de demodulación, luego los filtros no dejan pasar la frecuencia de las señales portadoras, y después la señal pasa por los conversores analógico-digital (ADC) obteniendo finalmente las señales digitales no procesadas en formato .wav, dichas señales acondicionadas adecuadamente se muestran en la Figura 33.

Figura 33

Señal retrodispersada proveniente de los árboles



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Selección de Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)

Todo el sistema de radar deberá ser montado en un UAV, para esto es importante considerar la autonomía de vuelo y la capacidad de carga, asimismo se tuvo en consideración que cumpla las siguientes características:

- Peso máximo de carga mayor a 4 Kg.
- Mayor tiempo de vuelo.
- Costo menor a 50 mil soles.

Figura 34

DJI Matrice 600 PRO



Nota. Adaptado de DJI Matrice 600 PRO, por DJI.

Como primera alternativa se tuvo en cuenta el UAV DJI Matrice 600 pro debido a sus múltiples aplicaciones como filmación aérea profesional, topografía, agricultura de precisión, búsqueda y rescate. Luego, como segunda alternativa se tuvo al UAV DJI Spreading Wings S1000, puesto que también cumple con los requerimientos.

Figura 35

DJI Spreading Wings S1000



Nota. Adaptado por DJI Spreading Wings S1000, por DJI.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de ambos UAVs en cuanto a sistema de número de motores, temperatura de trabajo, peso sin carga, tiempo de vuelo y el precio.

Tabla 8*Comparación entre UAVs*

Vehículo aéreo no tripulado	DJI Matrice 600 PRO	DJI Spreading Wings S1000
Sistema de control de vuelo	A3 pro	A2
Número de motores	6	8
Temperatura de trabajo	-10 °C a +40°C	-10 °C a +40°C
Peso sin carga	9.5 Kg	4 Kg
Peso máximo de carga	6 Kg	7 Kg
Tiempo de vuelo	35 minutos	15 minutos
Precio	S/ 30000	S/ 40000

Fuente: Elaboración propia.

Los dos UAVs cumplen con los requerimientos necesarios, pero se eligió el UAV Matrice 600 pro debido principalmente a la autonomía de vuelo de 35 minutos.

3.6. Diseño e Implementación de la Etapa de alimentación

Con la finalidad de poder suministrar voltaje a los dispositivos del todo el sistema.

Se requiere implementar una fuente de alimentación para los circuitos de RF, sistema de adquisición (Raspberry PI4), USRP 2920.

Tabla 9*Requerimiento de voltaje y amperaje*

Dispositivo	Voltaje	Amperaje
Raspberry pi 4	5v	3A
USRP 2920	5v	3A

Fuente: Elaboración propia.

Para el suministro de alimentación de la Raspberry pi 4 se eligió Power Bank Xiaomi Redmi 20,000mAh el cual ofrece una potencia máxima de salida de 5.1v y 2.5 A. De igual manera se eligió una Power Bank Xiaomi Redmi para la alimentación de USRP 2920. Se hicieron pruebas de funcionamiento a ambos dispositivos verificando el rendimiento de batería y operatividad, no se tuvo ningún inconveniente.

Figura 36

Power Bank Redmi

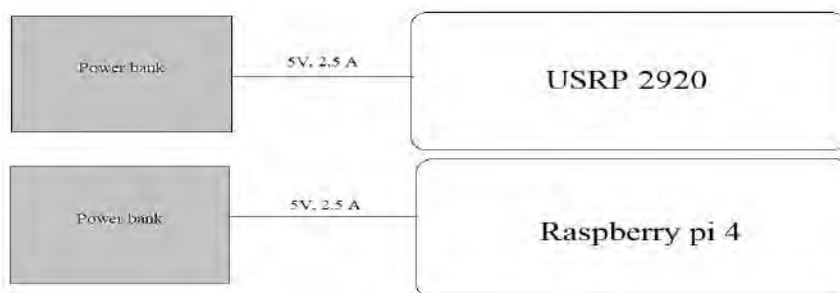


Fuente: Elaboración propia.

Se eligió el power bank Redmi 20000mAh debido a la capacidad de potencia que suministra y sobre todo al peso de 80g. Se usará 2 power banks para poder suministrar potencia a la Raspberry Pi 4 y URSP.

Figura 37

Diagrama de alimentación a dispositivos



Fuente: Elaboración propia.

Cada dispositivo tiene una autonomía de 3.3 horas aproximadamente de duración lo cual es suficiente para la toma de datos del sistema de radar teniendo en cuenta la duración de las baterías del drone que es de 15 min.

3.7. Sistema de radar montado en el UAV

Primero se diseña el chasis de acuerdo a la medida del USRP (16 cm de ancho, 4.7cm de altura) ya que es el dispositivo más grande y pesado, luego se diseña e imprime con impresora 3D con el material PLA.

Luego, para poder montar todo el sistema de radar se tiene que tener en cuenta el peso máximo que puede cargar el drone que es de 5Kg.

Tabla 10

Peso por cada Dispositivo y accesorio

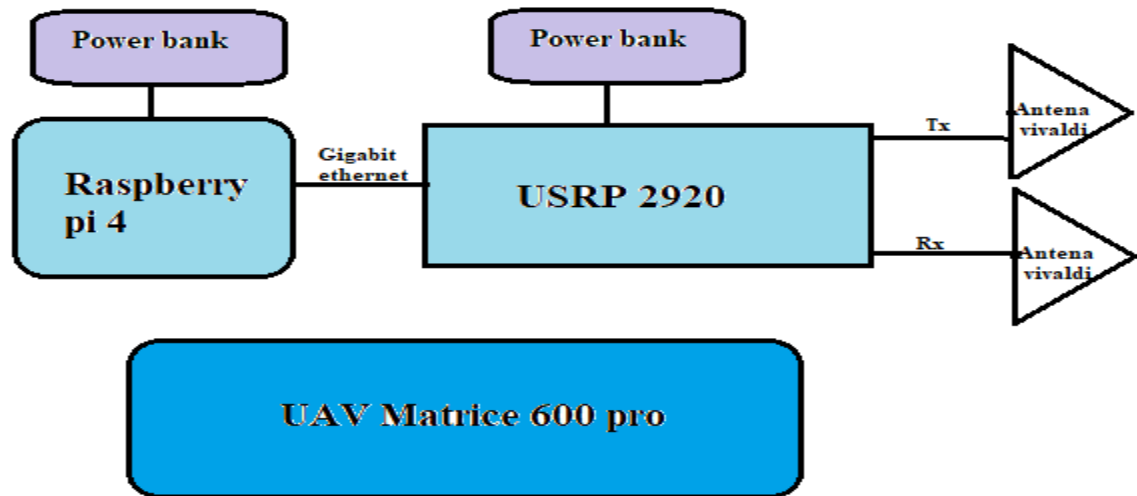
Ítem	Peso
Raspberry pi 4	45g
USRP 2920	1.19 Kg
Power bank (2 unidades)	400g
Antenas Vivaldi (2 unidades)	80g
Chasis	450g
Total	1.9Kg

Fuente: Elaboración propia.

En todos los dispositivos y accesorios que serán montados al drone se tiene un peso de 1.9Kg inferior a peso máximo de carga, lo que permite tener una mayor duración de batería del drone.

Figura 38

Diagrama del UAV con el sistema de radar implementado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39

UAV con el sistema de radar



Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener el chasis lo más compacto posible con las antenas direccionadas hacia abajo, así como el Raspberry Pi 4, cable coaxial, cable utp deben estar fijas para no tener problemas con los movimientos que realice el drone.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DEL SISTEMA RADAR

4.1. Pruebas en tierra usando Radar implementado y PC

En el anterior capítulo se mencionó que la tarjeta de USRP será controlado por el software GNU radio, para esto es importante tener instalado el sistema operativo Windows 10 y realizar la instalación de software GNU radio.

Luego de instalar el software en la computadora, agregar los paquetes adicionales UHD para poder controlar la tarjeta USRP. La computadora de escritorio o PC que se usó es una Workstation HP Z4, Windows 10 pro 64 bits, con procesador Intel Core I9 (3 Ghz-4.6GHz).

Figura 40

Conexión entre la PC-USRP



Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la conexión física entre la tarjeta USRP y PC, mostrado en la Figura 40, luego se procede a comprobar la comunicación, para esto se usa el comando ping 192.168.10.1 Si la PC no cuenta con puerto Gigabit Ethernet no se logrará la comunicación.

Es importante mencionar que existen otras tarjetas USRPs que no necesitan la conexión Gigabit Ethernet, estas pueden trabajar con puerto Ethernet, USB 2.0 y USB 3.0.

Figura 41

Comunicación entre la PC y USRP.

```
Administrador: Símbolo del sistema - ping 192.168.10.1 -t
Microsoft Windows [Versión 10.0.17763.615]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Windows\system32>ping 192.168.10.1 -t

Haciendo ping a 192.168.10.1 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.10.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=128

```

Fuente: Elaboración propia.

Figura 42

Distancia entre la antena transmisora y receptora



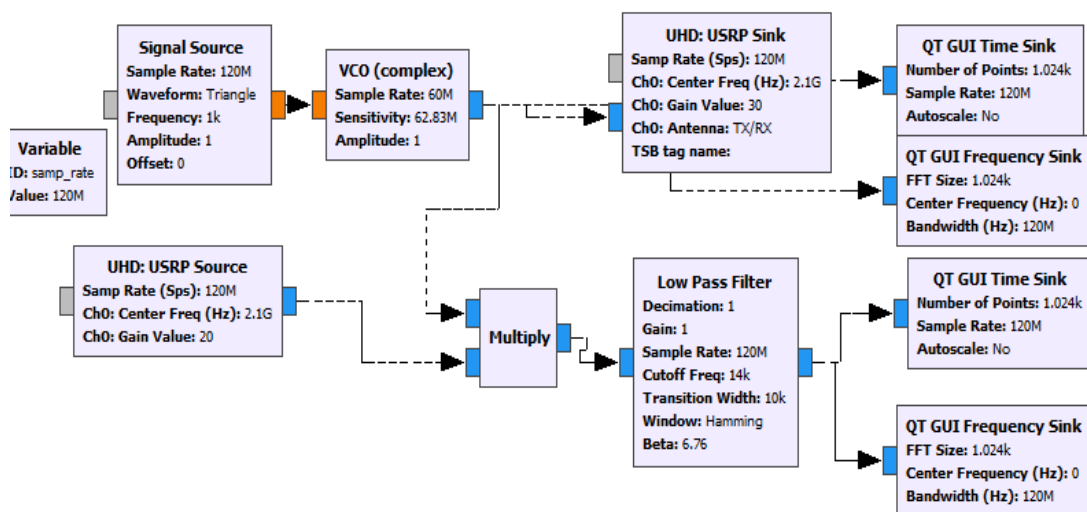
Fuente: Elaboración propia.

Al momento de realizar las pruebas se detecta que la señal transmitida sin llegar a su objetivo ya es capturada por la antena receptora lo que genera ruido o información errónea, por esto se considera una distancia mínima entre la antena transmisora y antena receptora. La distancia mínima es de 4 cm a esta distancia no se percibe dicha interferencia.

Implementado el radar FMCW en GNU radio y logrando la comunicación con el USRP, además de considerar las indicaciones dadas líneas arriba, se realizan las pruebas en el laboratorio de Control y Automatización de la UNSAAC en un espacio con presencia de equipos, teniendo como objetivo el papel aluminio dado que tiene mayor reflectividad, también se hicieron pruebas detectando la pared.

Figura 43

Diagrama de bloques de radar FMCW en GNU radio- conectado a PC

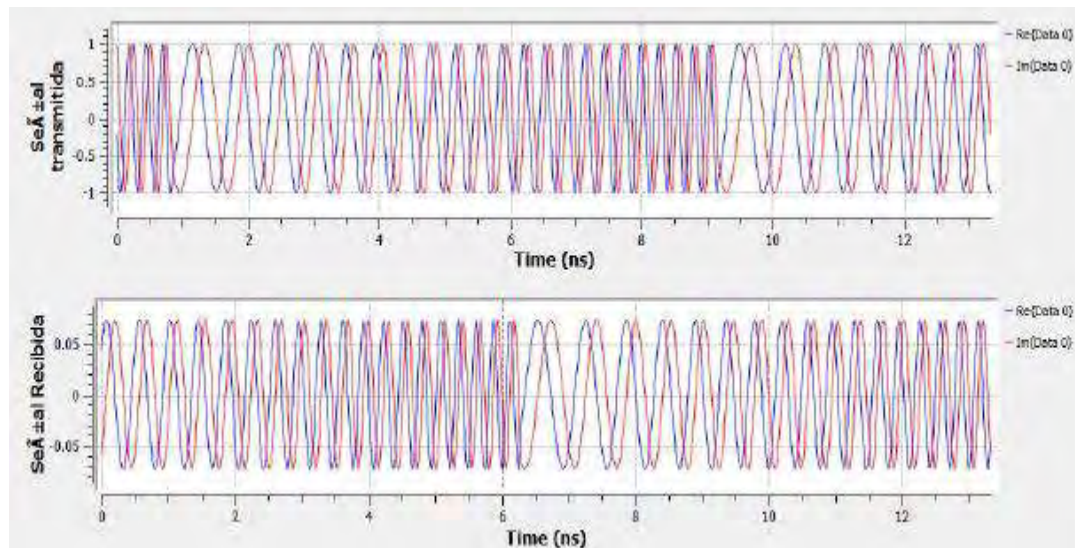


Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas en laboratorio se realizaron utilizando como frecuencia central 2.1 GHz y 40 MHz de ancho de banda utilizando al máximo los recursos de la PC y USRP.

Figura 44

Diagrama de bloques de radar FMCW en GNU radio- conectado a PC

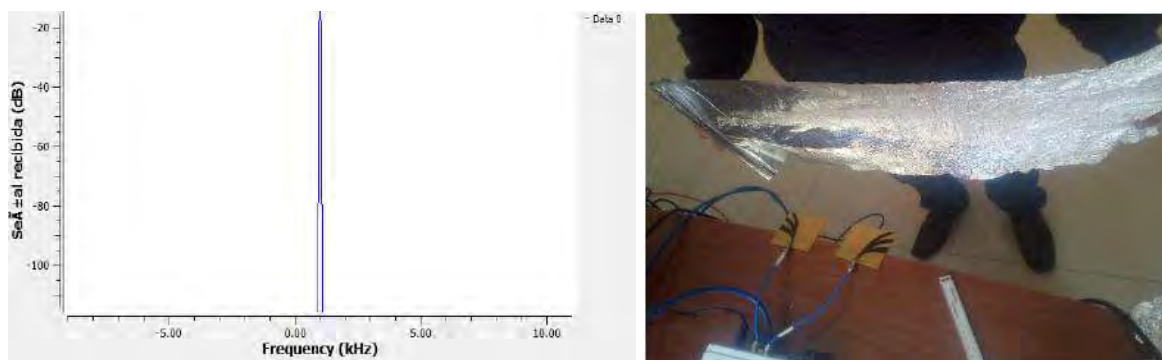


Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 44 como señal transmitida hacia el medio a la salida del bloque “UHD: USRP Sink” se tiene a la señal chirp en el dominio del tiempo, como señal recibida se tiene a la señal reflejada antes de ser multiplicado con la señal transmitida.

Figura 45

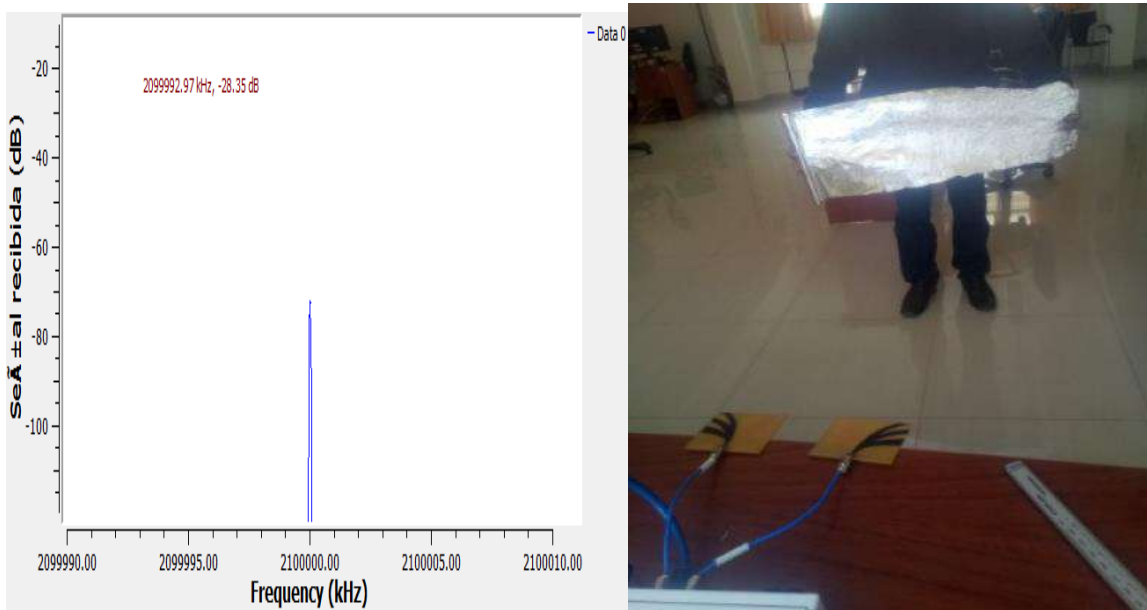
Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 10 cm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46

Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 100 cm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47

Respuesta en el dominio de la frecuencia de la señal recibida con un objetivo a 200 cm.



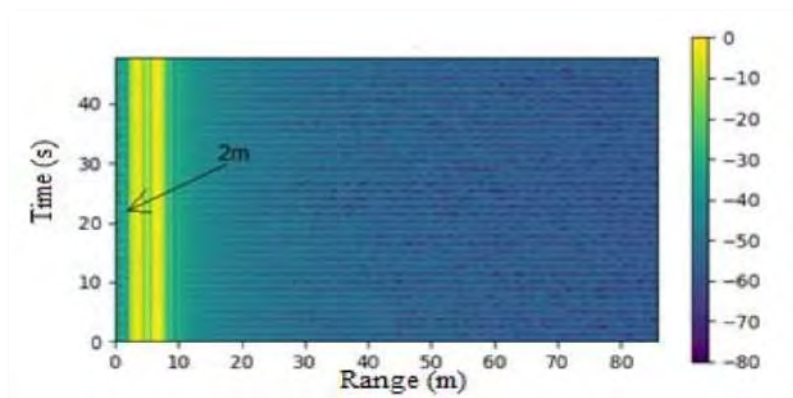
Fuente: Elaboración propia.

En las pruebas realizadas utilizando papel aluminio se pudo detectar que mientras más se aleja el objetivo, la señal reflejada se atenúa más, la distancia máxima alcanzada fue de 10m, superando los 10 metros ya no se detecta una señal reflejada. Por lo tanto, el sistema de radar tiene 10 metros de alcance máximo.

En la siguiente prueba se utilizó como objetivo la pared, utilizando el mismo radar FMCW de la Figura 47. En esta prueba se aplicó el código de preprocesamiento para poder ver el espectrograma donde se gráfica distancia vs frecuencia.

Figura 48

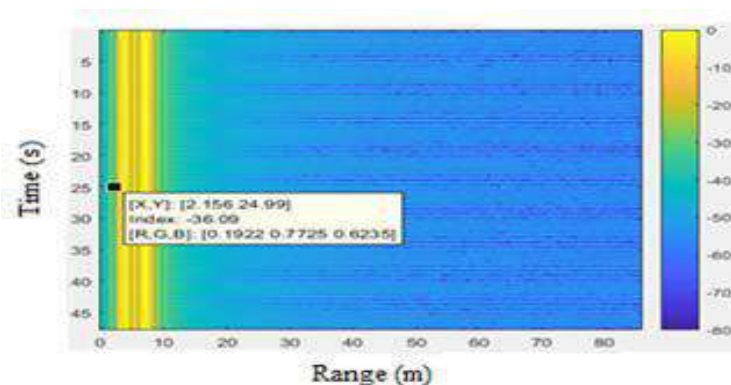
Espectrograma en Python (Detección de la pared)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49

Espectrograma en MATLAB (Detección de la pared)



Fuente: Elaboración propia.

Se implementó el código de preprocesamiento en la plataforma de programación Matlab y lenguaje de programación Python, en ambos se consiguió similares resultados. La única diferencia es el tiempo de compilación en Python se ejecuta todo el programa en menor tiempo.

En el espectrograma de la Figura 49 cuyas dimensiones son tiempo (segundos) y rango (metros), se observa una línea de color amarillo que representa la pared y la barra vertical que representa potencia de cada pixel expresada en decibelios o dBs. De esta manera se valida el funcionamiento de radar para determinar distancias, utilizando pared, papel aluminio etc., cabe aclarar Para estas pruebas el radar de onda continua, se ubicó en una posición fija de igual manera el objetivo (pared) estuvo estático, es importante mencionar que para esta prueba de funcionamiento de radar y medición de distancia se usó la pared en un ambiente libre.

4.2. Pruebas de Vuelo usando el UAV Matrice 600pro

Las pruebas de vuelo se realizaron usando la programación de vuelo manual para esto es necesario el uso de un control remoto y dispositivo móvil. El control remoto se conecta al dispositivo móvil a través de cable USB (Figura 50).

Figura 50

Control remoto de Drene matrice 600 pro conectado a Celular



Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el aplicativo móvil DJI GO dicho aplicativo tiene como requerimiento mínimo, sistema operativo:

- Android 4.1.2
- IOS 8.0.

Durante las pruebas es necesario considerar que el control remoto tiene una distancia máxima de transmisión de 5 km en una zona abierta sin interferencias electromagnéticas, si se tiene interferencias el alcance se reducirá hasta 3.5 km. Y una altura de 120 metros como máximo.

Figura 51

Interface de software DJI GO de aplicativo móvil.



Fuente: Elaboración propia.

En la interface DJI GO se observa parámetros para poder llevar a cabo el vuelo de manera segura como; la altura del suelo respecto al dron, velocidad de vuelo, distancia recorrida, indica el número de satélites conectados, porcentaje de nivel que le queda a las baterías del dron.

Una vez que se tenga el control remoto conectado a través de cable USB con el dispositivo móvil e instalado el aplicativo DJI GO, se procede a encender el control y dron, se vinculará automáticamente.

Los datos de vuelo se registran y almacenan automáticamente en la memoria interna del dron y aplicativo DJI GO, para ver estos datos se ingresa al aplicativo DJI GO o se conecta el dron al PC a través del puerto Micro USB. Luego, se realizaron pruebas de vuelo con diferentes cargas y diferentes horarios con la finalidad de determinar la autonomía de las baterías y estabilidad del dron (Figura 52 y Figura 53).

Figura 52

Cargas de 2.0 Kg, 2.9 Kg y 1.10 Kg.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53

Drone con las diferentes cargas 2.0 Kg, 2.9 Kg y 1.10 Kg.



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de vuelo se realizaron utilizando una mochila con libros de diferentes pesos, se fue aumentando de manera gradual. La mochila se sujetó y aseguró al drone lo más fijo posible para evitar inestabilidad. Además dichas pruebas se realizaron en la mañana (6:00am - 9:00am), medio día (11:00 am -13:00 pm) y en la tarde (16:00 pm- 18:00) se escogieron estas horas debido a que en estos horarios se presentan cambios bruscos de temperatura, así poder ver la estabilidad del drone. Al momento de realizar las pruebas con las diferentes cargas en el horario de (6:00 am – 9:00 am) y (11:00 am -13:00 pm) el drone logró despegar sin problemas y pudo mantenerse estable en vuelo. En el horario de (16:00 am – 18:00 am) el drone logró despegar sin problemas, sin embargo, los fuertes vientos provocaban inestabilidad en el drone lo que podría afectar el funcionamiento del radar. Por tal motivo se tomarán los datos durante la mañana.

Tabla 11

Autonomía de vuelo para diferentes cargas

Carga en Kg	Autonomía de vuelo en minutos		
	(6:00am - 9:00am)	(11:00 am - 13:00 pm)	(16:00 pm - 18:00)
2.9	12	12	10
2	15	15	14
0.6	22	22	20
Sin carga	26	26	25

Fuente: Elaboración propia.

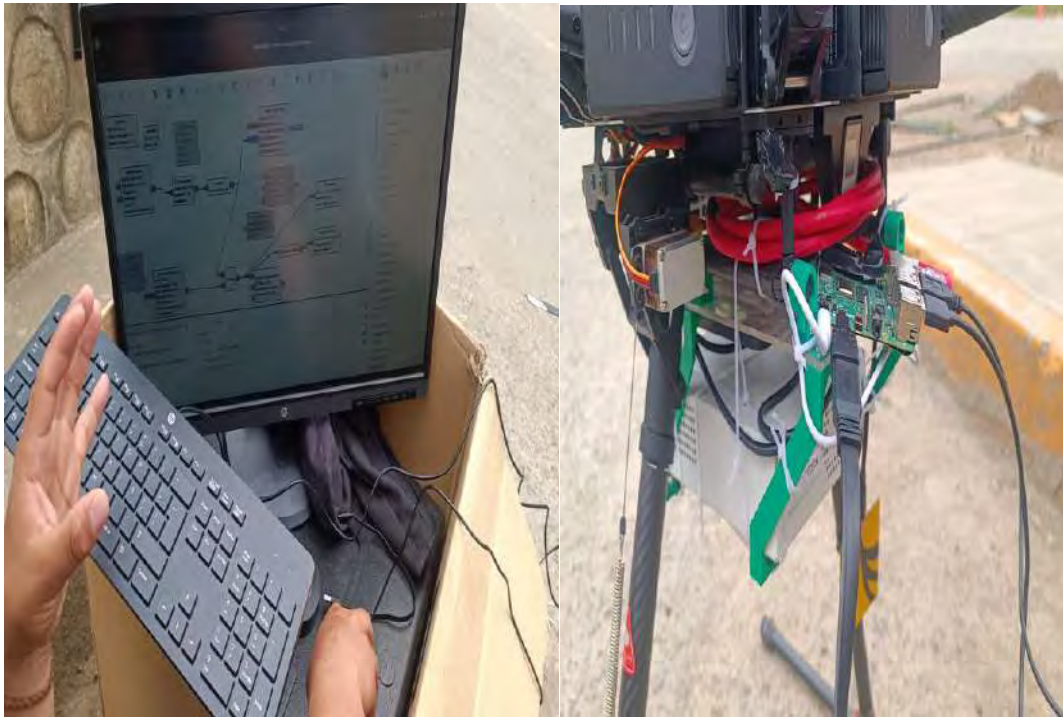
A partir de las 16 horas la autonomía de vuelo se ve afectada por los vientos, ya que el drone tiene que hacer mayor esfuerzo para mantenerse en el aire. Todo el sistema de radar tiene un peso de 1.9 Kg y de acuerdo a las pruebas que se realizaron se tendrá una autonomía de vuelo de 15 minutos aproximadamente.

4.2.1. Pruebas de vuelo con el sistema radar montado

Las pruebas y toma de datos se realizaron en la selva alta de Santa Ana – La Convención exactamente en el Balneario de Sambaray y para poder realizar las pruebas del sistema de radar en vuelo, primero se realiza la conexión entre las Raspberry Pi 4 - USRP. El procedimiento es el mismo que la conexión USRP-PC, se valida la comunicación usando Ping 192.168.10.1, se sujeta y ajustan todos los dispositivos, USRP, Raspberry Pi 4, Power Bank, cables de conexión en el chasis de tal manera que al momento de despegar no se mueva ningún componente.

Figura 54

Sistema de radar montado en UAV



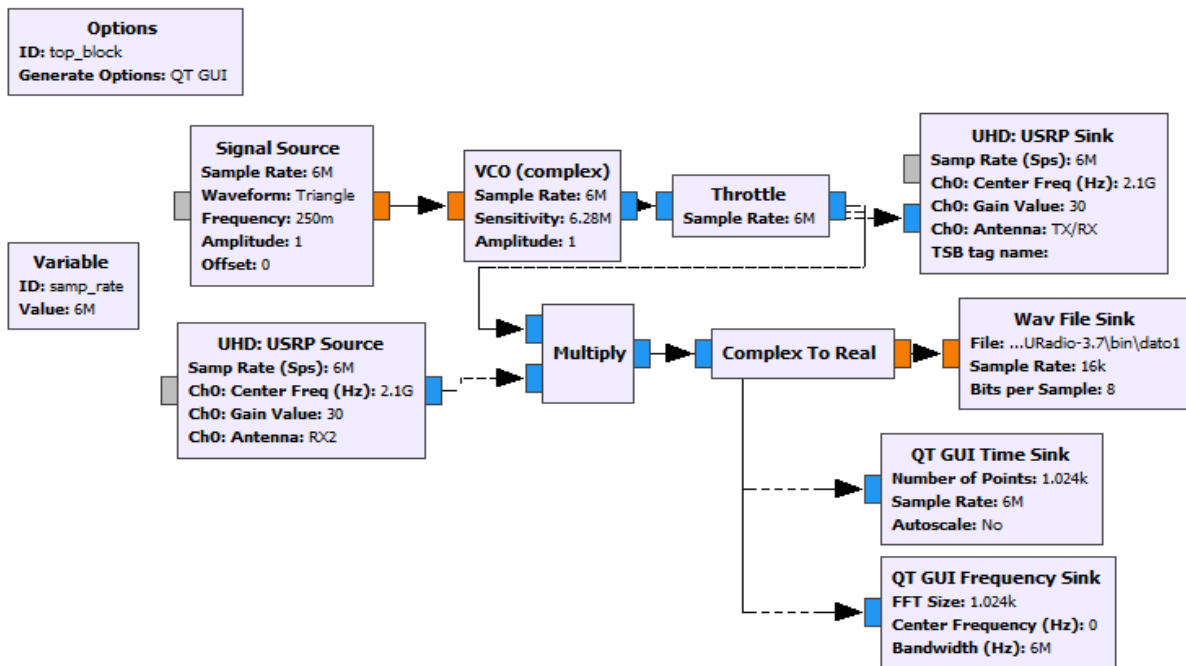
Fuente: Elaboración propia.

Para la configuración y compilación del software GNU radio se utilizó un monitor (el cual funciona con 220v) en el lugar se tenía a disposición la toma eléctrica.

Se observó que el drone se pudo mantenerse estable en vuelo, además que el sistema de adquisición de datos también estuvo operativo durante el vuelo.

Figura 55

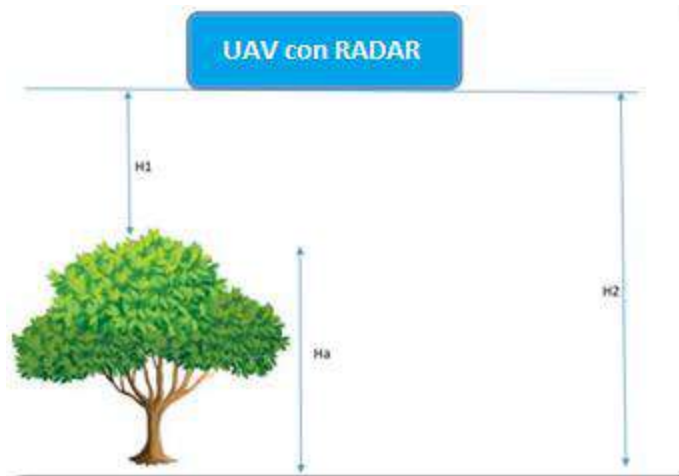
Radar FMCW implementado para pruebas de vuelo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56

Diagrama del sistema implementado para la toma de datos y estimación de la altura de los árboles



Fuente: Elaboración propia.

H: Altura del suelo al radar, dato generado por el dron.

H1: Altura de la copa del árbol al radar, dato generado a partir del preprocesamiento de la señal reflejada.

Ha: Altura del árbol $H_a = H_2 - H_1$.

Durante las pruebas realizadas el dron estuvo a 15 m sobre la superficie. Es decir, $H_2=15$ m.

Figura 57

UAV con el sistema de radar realizando el barrido para la toma de datos



Las pruebas del sistema se realizaron en el distrito de Santa Ana ubicado en la provincia de la Convención este escenario contiene una gran variedad de árboles (palmeras y árboles de frutos)

En este proyecto de tesis, los datos capturados por el sistema de radar implementado son señales retrodispersadas provenientes de la copa del árbol y son guardados en archivo.wav, luego estos datos son extraídos de la Raspberry Pi 4 usando USB. La data extraída se procesa en un PC Work station por el algoritmo implementado obteniendo un espectrograma tiempo vs distancia (range), cuyos resultados se mostrarán en el próximo capítulo.

Se realizaron 5 muestras (50 árboles aproximadamente) cada toma duró 10 minutos lo que dura la batería del dron aproximadamente esto con el fin de tener mayor información posible.

Finalmente, de las pruebas en vuelo se concluye que los datos obtenidos fueron satisfactorios, debido a que se validó el funcionamiento el sistema de radar (midiendo distancias), sistema de adquisición y almacenamiento de datos se mantuvieron operativos a lo largo del vuelo, y es óptimo para su posterior preprocesamiento. Las baterías del dron duraron 15 minutos tal como se había previsto.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

En el presente capítulo, se tiene las pruebas realizadas del radar FMCW implementado sobre el USRP 2920 a través de la configuración mediante bloque en GNU radio. El radar FMCW se montó a bordo de un Vehículo Aéreo No Tripulado usando el Raspberry Pi 4 como sistema de adquisición de datos. El radar de onda continúa implementado opera a una frecuencia central de 2.1GHz y un ancho de banda de 1MHz, por lo tanto, este radar no sufre interferencias con las frecuencias de Wi-Fi.

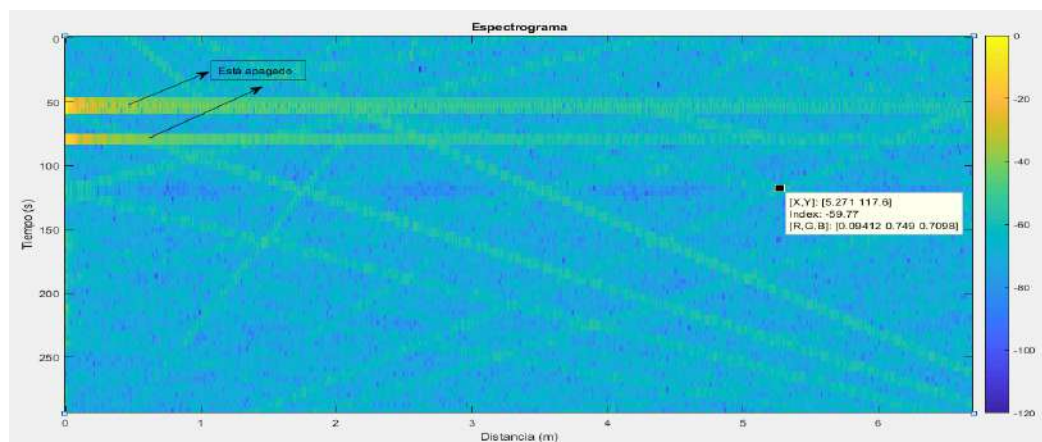
5.1. Resultados de las pruebas realizadas

Al momento de analizar los datos se eligió los datos que menos interferencia o ruido tiene.

En esta parte, se muestra los resultados del procesamiento del dato '4_5_10.wav' capturados por el radar a bordo del UAV, estos datos son señales retrodispersadas por el dosel del árbol o la copa del árbol.

Figura 58

Espectrograma de la toma 1

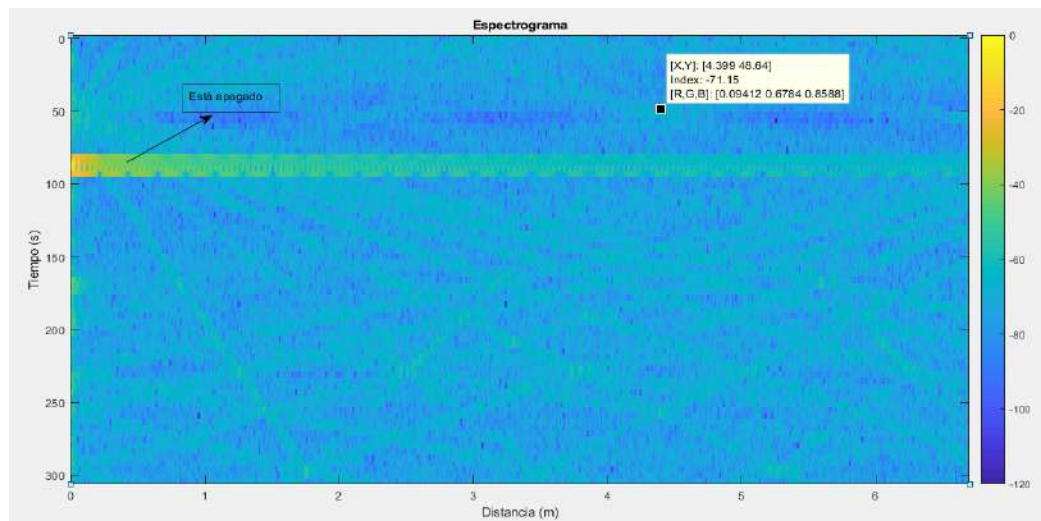


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 58, se puede apreciar bastante interferencia y apenas se puede notar un punto reflectante muy débil, dicha interferencia puede ser provocado por el aire, la humedad del aire y fallas del sistema de radar, como por ejemplo en el instante de tiempo 50 a 100 segundos el sistema de radar FMCW se apagó dos veces.

Figura 59

Espectrograma de la toma 2

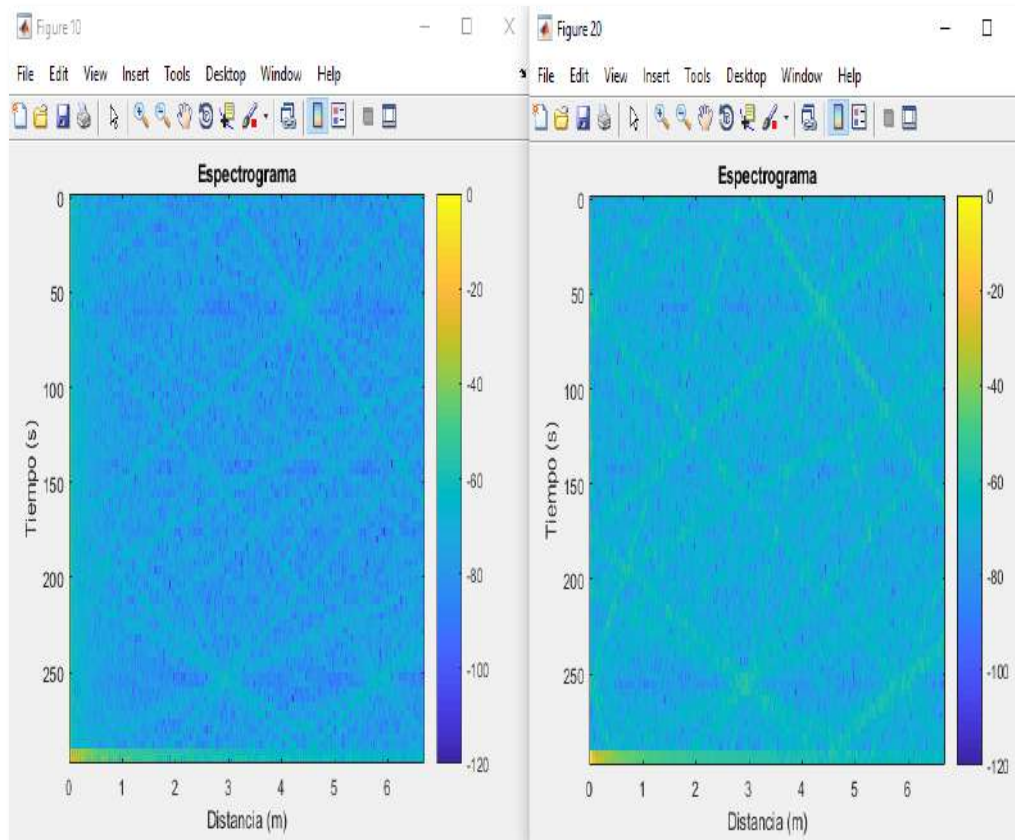


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 59, se muestra un espectrograma como resultado del procesamiento del dato '4_10_15.wav', en la cual se observa que en el intervalo de 50 a 100 segundos el sistema de radar FMCW, se apagó una vez. Luego, con respecto los puntos reflectantes de la copa del árbol son muy débiles y casi no se puede apreciar bien.

5.2. Resultados finales

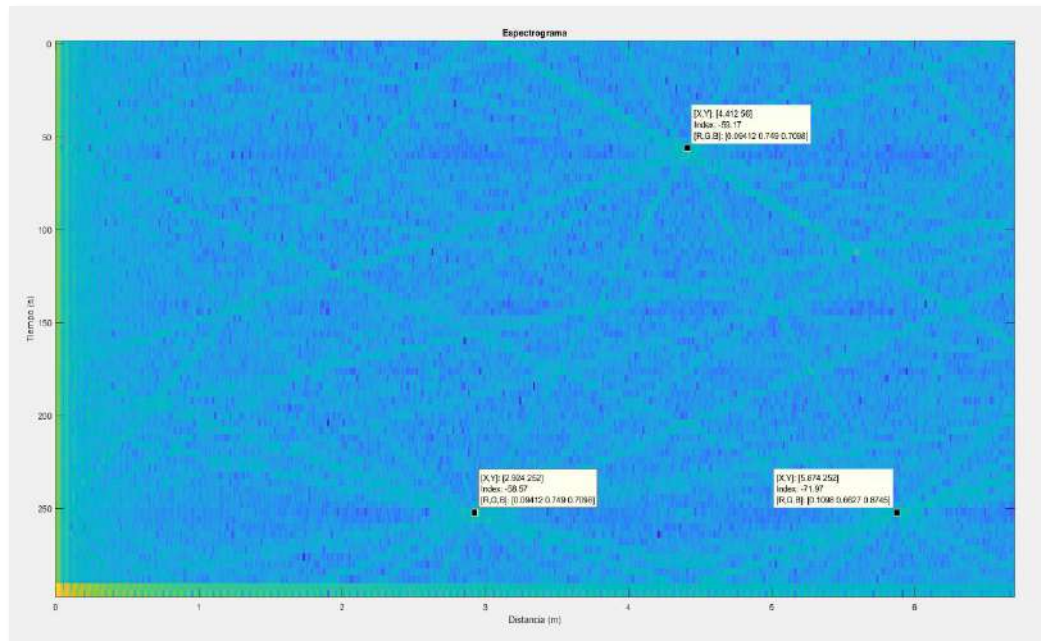
El procesamiento del dato '4_0_5.wav', y utilizando el código de procesamiento de señales de radar FMCW, cuyo diagrama de flujo/bloques se muestra en la Figura 15, se muestran tres puntos donde se tiene mayor cantidad de reflectores como se observa en los siguientes espectrogramas.

Figura 60*Espectrograma de las señales reflejadas***Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 60, se observa que el espectrograma de la izquierda está sin filtro, mientras tanto el de la derecha está con rechazo de ecos no deseados además el eje vertical representa el tiempo en segundos (tiempo de captura de datos) y el eje horizontal representa la distancia en metros. Las barras verticales representan la potencia de cada pixel y varían de 0 a -120dB.

Figura 61

Distancia medida entre el UAV y la copa del árbol



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 61, se muestra la imagen generada a partir de los datos preprocesados del escenario de medición, se observan tres reflectores cuyas distancias entre el vehículo aéreo no tripulado (UAV) y los reflectores (árbol) son: $H1 = 2.904\text{m}$, $H1 = 4.412\text{m}$ y $H1 = 5.874\text{m}$ respectivamente, la distancia entre el suelo y el dron es de $H2=15\text{m}$. Por lo tanto, las alturas de los árboles son: $Ha = 12.076\text{m}$, $Ha = 10.588\text{m}$ y $Ha = 9.126\text{m}$. Los reflectores representan la copa de los árboles.

CAPÍTULO VI

COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE RADAR IMPLEMENTADO CON OTROS MÉTODOS USADOS PARA MEDIR PARÁMETROS FORESTALES

6.1. Medición de Altura de los árboles utilizando medidor laser

Como primer método de medición se usó el medidor laser de distancia. Para esto se utiliza la técnica del triángulo recto.

Figura 62

Medición de la altura del árbol



Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la medición de la hipotenusa (d_2) y el cateto (d_1), luego se utiliza el teorema

de Pitágoras con la que se obtiene h_a (altura del árbol). $h_a = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$.

Tabla 12*Alturas medidas utilizando medidor laser*

d_1 (m)	d_2 (m)	h_a (m)
9.5	4.5	10.5
9.7	4.9	10.8
7.3	4.3	9.9

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 13***Comparación de alturas medidas utilizando el sistema de radar y utilizando medidor laser.*

h_a (m) Altura del árbol utilizando medidor laser	H_a (m) Altura del árbol utilizando sistema de radar	<i>error de medición</i> %	Tiempo de medición utilizando medidor laser (minutos)	Tiempo de medición utilizando sistema de radar (minutos)
10.5	12.07	14.9	7	2
10.8	10.58	2	8	2
9.9	9.12	7.2	7	2

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando el medidor laser se consiguió mediciones de la altura del árbol, inicialmente se mide la hipotenusa proyectando con el medidor laser después se proyecta la luz infrarroja a la base del árbol con ambos datos medidos se consigue la altura del árbol, todo este proceso demorará entre 7 a 8 minutos por cada árbol. En cambio, el sistema de radar implementado demora por cada árbol 2 minutos. Lo que permite al sistema tomar más datos.

6.2. Medición de Altura de los árboles utilizando técnicas manuales

En el documento ((MINAM, MINAGRI), 2013) se explica la metodología para realizar el primer inventario nacional forestal. Además, se detallan las consideraciones

preliminares para el muestreo y toma de datos para realizar las mediciones de parámetros forestales (altura, diámetro, identificación de especie, calidad de fuste etc.). Para el inventario realizado se tomaron 7,293 muestras para todo el país, con diferentes cantidades por eco zona como se muestra en la tabla 12. El INF tuvo un ciclo de cinco años, desde 2013 hasta 2017 durante cada año se midió 20% de la muestra.

Las mediciones que se realizaron se hicieron de manera manual usando cintas métricas, clinómetros, formularios etc.

Figura 63

Medición de la altura de los árboles utilizando instrumentos manuales



Nota: Imagen extraída del Inventario Nacional Forestal ((MINAM, MINAGRI), 2013)

Tabla 14

Cuadro de distribuciones por ecozonas

Ecozona o sub población	Total de parcelas de muestreo	Distancia promedio entre parcelas (km)
Selva Baja	808	24
Hidromórfica	91	31
Selva alta accesible	288	20
Selva alta de difícil acceso	101	34
Costa	460	19

Sierra	5545	8
Total de muestras	7293	

Nota: Cuadro extraído del Inventario Nacional Forestal ((MINAM, MINAGRI), 2013)

Cada muestra (parcela) mide entre 2 km² a 5 km² aproximadamente y la parcela se divide en subparcelas que miden entre 100m² a 500m², en la medición de las parcelas participan entre 3 a 10 personas (enfermero, personal de campo, conductor, cocinero, guía, ayudante) dependiendo de la dificultad de acceso al lugar, se dividen por comisiones. A continuación, se muestra cuadro de las mediciones realizadas según su dificultad en la toma de datos.

Tabla 15

Medición de parcelas según su dificultad en la toma de datos

Nivel de dificultad De acceso	Fácil	Medio	Difícil
	Número de parcelas medidas	15 a 20	8 a 10
Días de medición de parcelas	18-22	22-23	22
Total de días de comisión	27	27	27

Nota: Datos extraídos del Inventario Nacional Forestal ((MINAM, MINAGRI), 2013)

De acuerdo a la Tabla 14 la toma de datos por parcela demora un día aproximadamente cuando el nivel de dificultad de acceso al lugar es fácil, asumiendo que una parcela tiene 2 km², y se tiene 4 subparcelas de 500 m², entonces cada subparcela es medida en dos horas aproximadamente considerando 40 minutos de traslado desde una subparcela hasta otra subparcela. El parámetro que más demora medir es la altura por lo

menos se requiere de 40 minutos por árbol dependiendo de la dificultad y 40 minutos para la toma de los demás parámetros.

El área que se utilizó para la toma de datos con el sistema de radar implementado es de $600m^2$ lo que equivale a una subparcela, la toma de datos se realizó en 10 minutos considerando 40 minutos de transporte hasta otra subparcela y 40 minutos para la toma de los demás parámetros forestales. Las mediciones por subparcela necesitaran de una hora y media.

Tabla 16

Proyectado de la medición de parcelas usando el sistema de radar implementado

Nivel de dificultad de acceso	Fácil	Medio	Difícil
Número de parcelas medidas	22 a 26	12 a 14	6 a 8
Días de medición de parcelas	18-22	22-23	22
Total de días de comisión	27	27	27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Comparación de las características de sistema de radar implementado con el método manual de medición de parámetros forestales

Características	Sistema de radar implementado	Método manual de medición utilizado por ((MINAM, MINAGRI), 2013)
Medición de altura de árboles	2 minutos	40 minutos

Genera riesgo al momento de realizar las medidas	NO	Si (Caídas a nivel, caída a desnivel, ataque de animales, cortes etc.)
Se pueden tomar medidas en clima adverso	SI	NO

Fuente: Elaboración propia.

Con el sistema de radar implementado se podría aumentar la medición de una subparcela por día lo que al mes se podría tener las mediciones de 4 parcelas más en promedio. Es importante mencionar que el radar puede funcionar en condiciones adversas, sin embargo, la lluvia y neblina podrían dañar los componentes del sistema de radar, inclusive el mismo dron podría dañarse por la humedad.

Finalmente, el sistema de radar implementado tiene la capacidad de tomar más datos, inclusive de tomar datos de lugares inaccesibles y no exponer al peligro al personal de campo.

CAPÍTULO VII

PRESUPUESTO

Se detallan los costos de los equipos utilizados, útiles de escritorio, pasajes y viáticos para la toma de datos e implementación del sistema de radar.

Tabla 18

Costo de implementación

N°	Ítem presupuestal	Clasificación	Cantidad	Precio Unitario (S/.)	Precio total (S/.)
01	Matrice 600 DJI pro		1	30000	30000
02	Accesorios cables, conectores		1	300	300
03	USRP 2920		1	20000	20000
04	Power Bank		2	80	160
05	Raspberry pi 4	Equipos utilizados	1	500	500
06	Computadora Work Station		1	13000	13000
07	Antena Vivaldi		2	500	1000
08	Papel bond		3	20	60
09	Impresiones y copias	Útiles de escritorio	1	200	200
10	Movilidad y viáticos	Movilidad y Viáticos para la toma de datos	9	80	720
11	Horas hombre	Personal	3	3000	9000
Costo Total					S/.74940

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar e implementar un sistema de radar de onda continua FMCW biestático con una frecuencia central de 2.1 GHz, usando el USRP 2920 que se encuentra en el laboratorio de Telecomunicaciones- UNSAAC. Sistema de radar es capaz de medir distancias entre el radar y objetos que se encuentran a su paso. Se realizaron pruebas tanto en tierra y en vuelo logrando determinar diferentes distancias, teniendo como objetivos; papel aluminio, pared, copa del árbol. Al momento de realizar pruebas con la copa del árbol, se consiguió medir la distancia entre la copa y el dron lo que permitió medir la altura del árbol comprobando el funcionamiento del sistema de radar FMCW.
2. Se logró la comunicación entre el USRP y Raspberry Pi 4 para la captura de señales chirp dispersados por la copa del árbol, logrando implementar el sistema adquisición de datos con un sistema de almacenamiento de datos flexible. Es decir, se puede añadir un micro SD de más capacidad para incrementar el almacenamiento de datos.
3. El radar FMCW con una señal chirp en la transmisión es limitado por el ancho de banda de 1MHz del Raspberry Pi 4 teniendo una resolución en distancia de 150 m, cuya configuración es aplicable en cualquier modelo de USRP que se tenga en la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.
4. El algoritmo implementado muestra un espectrograma donde se puede visualizar las dimensiones, como son: el tiempo en segundos (eje vertical) y la distancia en metros (eje horizontal) entre el radar y el dosel del árbol, como consecuencia logrando calcular la altura del árbol.

5. Se realizó una comparación del sistema de radar implementado con los sistemas tradicionales de medida de la altura del árbol. Se concluye que sistema de radar tiene la capacidad de tomar más datos en menos tiempo, además se podrían tomar datos de lugares inaccesibles sin exponer al peligro al personal de campo.
6. Al momento de comparar el sistema de radar implementado con el método de medición laser, se consiguieron errores de medición de 2%, 14.9 %, 7.2%.

RECOMENDACIONES

1. Sí se desea aumentar la autonomía de vuelo del drone se recomienda usar la batería TB48S y tener baterías extra. Lo que permitiría aumentar la toma de datos.
2. Es posible cambiar el USRP y Raspberry pi 4, por equipos que tengan mayores anchos de banda lo que aumentaría la resolución, de esta forma se podrían distinguir los objetos que se desean medir.
3. Este trabajo sirve de punto de inicio en cuanto al uso de radares para aplicaciones forestales en la UNSAAC, se podrían medir otros parámetros forestales como es diámetro de los árboles inclusive volumen de los árboles. Además, se podrían orientar a otras aplicaciones en arqueología, geología, agricultura, nevados, hidrología etc.
4. Se recomienda configurar el drone en vuelo automático, lo que permitirá ahorrar el tiempo de duración de baterías y tomar más datos. Siempre considerando los obstáculos que se puedan tener en su trayecto.
5. Se recomienda implementar un sistema de comunicación que permita la obtención de datos en tiempo real.

REFERENCIAS

- (MINAM, MINAGRI). (2013). *Metodología del inventario nacional forestal- Perú*. Lima.
- Aldana, E. (2008). *Medición forestal: texto para la carrera Ingeniería Forestal*. Cuba.
- Caballero, D. (2015). *Sistema de Adquisición de datos de un radar de sistema de Onda Continua en Frecuencia modulado montado en un Vehículo aéreo no Tripulado*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. Lima.
- Canelo, C., & Quiñones, W. (2015). *Diseño e implementación de un Sistema de Radar Estático de Corto Alcance de Onda Continua en Frecuencia Modulada para Mediciones de Rango y Velocidad*. Tesis de titulación, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima.
- Dionicio, R. H. (2019). *Caracterización de variables dasométricas y estimación de biomasa área de Cedrelinga Cateniformis (DUCKE) Ducke en el bosque reservado Unas-Tingo Maria, Huanuco*. Tingo Maria.
- Felguera, D. (2013). *Desarrollo de Técnicas Interferométricas para Radares de Alta Resolución en Milimétricas*. Madrid.
- Hein, A. (2004). *Processing of SAR Data*. Springer. doi:10.1007/978-3-662-09457-0
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Vol. 6). Mc Graw Hill.
- Jancco, J. (2021). *Diseño e implementación de señales SAR para la estimación de altura forestal*. UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO. CUSCO.

- Keysight. (8 de Diciembre de 2019). *Keysight*. Obtenido de Keysight: <https://www.keysight.com/en/pdx-x201924-pn-N9914A/fieldfox-handheld-rf-analyzer-65-ghz/?state=0>
- Masías, V. M. (2017). *Consideraciones para la Medición de Diámetros y Altura de Árboles Vivos de Polylepis Flavipila (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb*. Lima.
- Melvin, W. L., & Scheer, J. A. (2013). *Principles of Modern Radar* (Vol. III). SCITECH.
- Merchán, C. V. (2016). *Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba.
- Meza, L. P. (2015). *Biomasa Area y Contenido de Carbono de los Bosques del Area de Influencia de Carretera Iquitos-Nauta*. Perú. Iquitos.
- National Instruments. (23 de 07 de 2020). *NI*. Obtenido de NI: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.usrp-2901.html>
- Parí, G., Santana, L., Villanueva, E., & Zárate, D. (2017). *Planeamiento Estratégico del Sector Forestal en el Perú*. Lima.
- Pino, J. (2023). *Diseño e implementación de un radar de banda estrecha, utilizando SDR para la detección de objetos y medición de distancias*. Riobamba.
- Prabaswara, A., Munir, A., & Bayu, A. S. (20-21 de October de 2011). GNU Radio based software-defined FMCW radar for weather surveillance application. *2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*. doi:10.1109/TSSA.2011.6095440

Richars, M. A., Scheer, J. A., & Holm, W. A. (2010). *Principles of Modern Radar* (Vol. I).

Estados Unidos: SciTech.

Rojas, S. R. (2015). *Estimación de biomasa forestal mediante el uso de imágenes radar*.

Tesis de Maestria , UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, MADRID.

Selva, A. F., Reis, A. L., Lenzi, K. G., Meloni, L. G., & Barbin, S. E. (2012). Introduction to

the Software-defined Radio Approach. *IEEE Latin America Transactions*.

ANEXOS

CÓDIGO DE PREPROCESAMIENTO

```

clear all
close all
clc
[y,FS]=audioread('4_0_5.wav');
% se muestra la señal reflejada y filtrada
figure, plot(y(:,1)), title('Señal reflejada en el canal 1')
figure, plot(y(:,2)), title('Señal reflejada en el canal 2')
% Señal promedio del canal 1 y canal 2
% Filtrar o promediar imperfecciones en la señal
y_prom=(y(:,1)+y(:,2))/2;
figure, plot(y_prom), title('Señal promedio')
% datos del radar FMCW
c=3e8; % velocidad de la luz
Tp=4; %duracion de pulso
muestras=Tp*FS;% muestras por pulso
BW=1e6; % ancho de banda
rr = c/(2*BW); %range resolution
kr=BW/Tp; % tasa de la señal chirp
n=14; % factor de calibracion 14
max_range = c*FS/((2^n)*kr); % alcance máximo n=1,2,
p=0;% inicializando contador
% formacion de matriz de datos
for k=0:muestras:length(y_prom)
    if muestras+k<=length(y_prom)
        p=p+1;
        B(:,p)=y_prom(k+1:k+muestras)';
        time(p) = (k+1)*1/FS;
    end
end
% matriz formada
dato=B';
prom=mean(dato,1);
% quitando la parte DC

```

```

for pp = 1:size(dato,1)
    dato(pp,:)=dato(pp,:)-prom;
end
% adicionando ceros
muestraspad = 2^nextpow2(muestras);
% aplicando fft a filas y columnas,
% y determinando la potencia
v = dbv(fft(dato,muestraspad,2));
% maximo valor de v
m = max(max(v));
% para que el maximo valor sea 0dB
vv1=v-m;
% estableciendo rango
rango=linspace(0,max_range,muestraspad);
% seleccionar el espectro
seleccion=500;
figure(10), imagesc(rango(1:seleccion),time,vv1(:,1:seleccion),[-120, 0]);
colorbar;
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Tiempo (s)');
title('Espectrograma');
% rechazo de ecos no deseados
dato2 = dato(2:size(dato,1),:)-dato(1:size(dato,1)-1,:);
% aplicando fft a filas y columnas,
% y determinando la potencia
v = dbv(fft(dato2,muestraspad,2));
m = max(max(v));
% para que el maximo valor sea 0dB
vv=(v-m);
figure(20), imagesc(rango(1:seleccion),time,vv(:,1:seleccion),[-120, 0]);
colorbar;
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Tiempo (s)');
title('Espectrograma');
% adicional para observar el espectro completo
% figure(30), imagesc(rango, time, vv, [-120 0]);
% xlabel('Distancia (m)')

```

```
% ylabel('Tiempo (s)')  
% title('Espectrograma total');
```

ANEXO 2: FICHAS TÉCNICAS

a. HOJA DE DATOS DE USRP 2920

Transmitter

Frequency range	50 MHz to 2.2 GHz
Frequency step	<1 kHz
Maximum output power (P_{out})	
50 MHz to 1.2 GHz	50 mW to 100 mW (17 dBm to 20 dBm)
1.2 GHz to 2.2 GHz	30 mW to 70 mW (15 dBm to 18 dBm)
Gain range ¹	0 dB to 31 dB
Gain step	1.0 dB
Frequency accuracy ²	2.5 ppm
Maximum instantaneous real-time bandwidth ³	
16-bit sample width	20 MHz
8-bit sample width	40 MHz
Maximum I/Q sample rate ⁴	
16-bit sample width	25 MS/s
8-bit sample width	50 MS/s
Digital-to-analog converter (DAC)	2 channels, 400 MS/s, 16 bit
DAC spurious-free dynamic range (sFDR)	80 dB

Receiver

Frequency range	50 MHz to 2.2 GHz
Frequency step	<1 kHz
Gain range ⁵	0 dB to 31.5 dB
Gain step	0.5 dB
Maximum input power (P_{in})	0 dBm

Noise figure	5 dB to 7 dB
Frequency accuracy ⁶	2.5 ppm
Maximum instantaneous real-time bandwidth ⁷	
16-bit sample width	20 MHz
8-bit sample width	40 MHz
Maximum I/Q sample rate ⁸	
16-bit sample width	25 MS/s
8-bit sample width	50 MS/s
Analog-to-digital converter (ADC)	2 channels, 100 MS/s, 14 bit
ADC SFDR	88 dB

Power



Caution The protection provided by this product may be impaired if it is used in a manner not described in this document.

Total power, typical operation	
Typical	12 W to 15 W
Maximum	18 W
Power requirement	Accepts a 6 V, 3 A external DC power connector



Note You must use either the power supply provided in the shipping kit, or another UL listed ITE power supply marked *LPS*, with the USRP-2920.

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Physical dimensions

(L × W × H)	15.875 cm × 4.826 cm × 21.209 cm (6.25 in. × 1.9 in. × 8.35 in.)
Weight	1.193 kg (2.63 lb)

Environment

Maximum altitude	2,000 m (800 mbar) (at 25 °C ambient temperature)
Pollution Degree	2

Indoor use only.

Operating Environment

Operating temperature	23 °C ± 5 °C
Relative humidity range	10% to 90%, noncondensing (tested in accordance with IEC 60068-2-56)

Compliance and Certifications

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

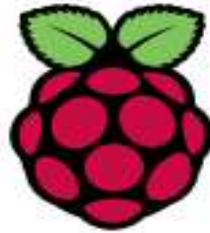
- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA C22.2 No. 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

b) HOJA DE DATOS DE RASPBERRY PI 4

DATASHEET



Raspberry Pi 4 Model B

Release 1

June 2019

Copyright 2019 Raspberry Pi (Trading) Ltd. All rights reserved.

2 Features

2.1 Hardware

- Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 running at 1.5GHz
- 1, 2 and 4 Gigabyte LPDDR4 RAM options
- H.265 (HEVC) hardware decode (up to 4Kp60)
- H.264 hardware decode (up to 1080p60)
- VideoCore VI 3D Graphics
- Supports dual HDMI display output up to 4Kp60

2.2 Interfaces

- 802.11 b/g/n/ac Wireless LAN
- Bluetooth 5.0 with BLE
- 1x SD Card
- 2x micro-HDMI ports supporting dual displays up to 4Kp60 resolution
- 2x USB2 ports
- 2x USB3 ports
- 1x Gigabit Ethernet port (supports PoE with add-on PoE HAT)
- 1x Raspberry Pi camera port (2-lane MIPI CSI)
- 1x Raspberry Pi display port (2-lane MIPI DSI)
- 28x user GPIO supporting various interface options:
 - Up to 6x UART
 - Up to 6x I2C
 - Up to 5x SPI
 - 1x SDIO interface
 - 1x DPI (Parallel RGB Display)
 - 1x PCM
 - Up to 2x PWM channels
 - Up to 3x GPCLK outputs

Symbol	Parameter	Minimum	Maximum	Unit
V _{IN}	5V Input Voltage	-0.5	6.0	V

Table 2: Absolute Maximum Ratings

Please note that VDD_IO is the GPIO bank voltage which is tied to the on-board 3.3V supply rail.

Symbol	Parameter	Conditions	Minimum	Typical	Maximum	Unit
V _{IL}	Input low voltage ^a	VDD_IO = 3.3V	-	-	TBD	V
V _{IH}	Input high voltage ^a	VDD_IO = 3.3V	TBD	-	-	V
I _{IL}	Input leakage current	TA = +85°C	-	-	TBD	μA
C _{IN}	Input capacitance	-	-	TBD	-	pF
V _{OL}	Output low voltage ^b	VDD_IO = 3.3V, I _{OL} = -2mA	-	-	TBD	V
V _{OIH}	Output high voltage ^b	VDD_IO = 3.3V, I _{OH} = 2mA	TBD	-	-	V
I _{OL}	Output low current ^c	VDD_IO = 3.3V, V _O = 0.4V	TBD	-	-	mA
I _{OIH}	Output high current ^c	VDD_IO = 3.3V, V _O = 2.3V	TBD	-	-	mA
R _{PU}	Pullup resistor	-	TBD	-	TBD	kΩ
R _{PD}	Pulldown resistor	-	TBD	-	TBD	kΩ

^a Hysteresis enabled.

^b Default drive strength (8mA)

^c Maximum drive strength (16mA)

Table 3: DC Characteristics

Pin Name	Symbol	Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Digital outputs	t _{rise}	10-90% rise time ^a	-	TBD	-	ns
Digital outputs	t _{fall}	90-10% fall time ^a	-	TBD	-	ns

^a Default drive strength, CL = 5pF, VDD_IO = 3.3V

Table 4: Digital IO Pin AC Characteristics



Figure 2: Digital IO Characteristics

5.1.3 Display Parallel Interface (DPI)

A standard parallel RGB (DPI) interface is available the GPIOs. This up-to-24-bit parallel interface can support a secondary display.

5.1.4 SD/SDIO Interface

The Pi4B has a dedicated SD card socket which supports 1.8V, DDR50 mode (at a peak bandwidth of 50 Megabytes / sec). In addition, a legacy SDIO interface is available on the GPIO pins.

5.2 Camera and Display Interfaces

The Pi4B has 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI CSI Camera and 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI DSI Display connector. These connectors are backwards compatible with legacy Raspberry Pi boards, and support all of the available Raspberry Pi camera and display peripherals.

5.3 USB

The Pi4B has 2x USB2 and 2x USB3 type-A sockets. Downstream USB current is limited to approximately 1.1A in aggregate over the four sockets.

5.4 HDMI

The Pi4B has 2x micro-HDMI ports, both of which support CEC and HDMI 2.0 with resolutions up to 4Kp60.

5.5 Audio and Composite (TV Out)

The Pi4B supports near-CD-quality analogue audio output and composite TV-output via a 4-ring TRS 'A/V' jack.

The analog audio output can drive 32 Ohm headphones directly.

5.6 Temperature Range and Thermals

The recommended ambient operating temperature range is 0 to 50 degrees Celcius.

To reduce thermal output when idling or under light load, the Pi4B reduces the CPU clock speed and voltage. During heavier load the speed and voltage (and hence thermal output) are increased. The internal governor will throttle back both the CPU speed and voltage to make sure the CPU temperature never exceeds 85 degrees C.

The Pi4B will operate perfectly well without any extra cooling and is designed for sprint performance - expecting a light use case on average and ramping up the CPU speed when needed (e.g. when loading a webpage). If a user wishes to load the system continually or operate it at a high temperature at full