

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Implementación de un sistema de radar en 2D con SDR y monitoreo en tiempo real mediante una aplicación móvil

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

Pablo David García Tobar

Alexander Adrián Herrera Echerry

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de graduación en primer lugar a Dios, quien fue, es y será siempre mi sustento y mayor motivación, todos los logros que alcance en esta vida serán siempre por Él y para Él.

Dedico también este trabajo a mis padres, Brenda Echerry y Serafín Herrera, gracias por apoyarme en las diferentes etapas de mi vida, su amor, y apoyo en todo momento han forjado al hombre que soy, los amo.

A mi hermano David Herrera, a mis tías Isabel Gómez, Luz María Gómez y Bertha Echerri, a mi prima Carolina Pazmiño y a Matt Larson, gracias a su apoyo incondicional, estoy eternamente agradecido con ustedes.

A mi compañero David García, por su amistad y compromiso para con este trabajo. A toda mi amada familia y amigos, muchas gracias.

DEDICATORIA

Deseo expresar mi eterno agradecimiento a Dios, quien estuvo a lado mío durante toda mi carrera universitaria.

Agradezco de todo corazón a mis padres y pastores, Pablo García y Maribel Tobar, a mi hermana, Rebeca García, quienes a través de su amor, paciencia y virtud no escatimaron ningún esfuerzo para poder alcanzar mis metas propuestas.

A mi novia y futura esposa, Antonella Castillo quien siempre me ha impulsado a seguir adelante para dar la mejor versión de mi cada día.

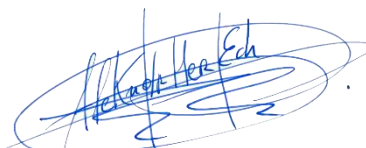
Ha sido un arduo trayecto que estoy culminando gracias al apoyo y guía de muchas personas importantes en mi vida tales como abuelos, tíos, maestros y amigos como Alexander Herrera quien gracias a su constancia ha sido como un hermano durante todo este caminar.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Pablo David García Tobar* y *Alexander Adrián Herrera Echerry* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”




Pablo David García Tobar



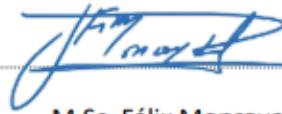
Alexander Adrián Herrera
Echerry

EVALUADORES



A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'W Medina'.

M.Sc. Washington Medina



A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'F Moncayo Rea'.

M.Sc. Félix Moncayo Rea

RESUMEN

Este estudio académico presenta un sistema de radar básico diseñado con SDR que integra la transmisión de datos a la nube en tiempo real. Actualmente existen varios estudios sobre radares, ya sea con microcontroladores, radio definida por software y nuevos equipos electrónicos de RF. El Laboratorio de Radiocomunicaciones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) necesita aprovechar los recursos de investigación disponibles y añadir dentro de su plan de actividades el estudio del efecto Doppler y la detección de la radiación del entorno mediante radio definida por software, enviando la información de la radiación a una aplicación móvil en tiempo real.

Para ello, se diseñó un sistema utilizando dispositivos SDR Adalm Pluto, que se conectan al PC para ser controlados por la herramienta virtual GNU Radio. Los datos recogidos de la simulación se almacenan en un fichero binario, por lo que es necesario utilizar el software Matlab para su lectura y procesamiento, aprovechando así su conexión con ThingSpeak y publicando la distancia a través de los widgets previamente instalados en un dispositivo móvil. Finalmente, se comprueba que la precisión del radar es de hasta 60 cm desde el origen (después de la zona de Fresnel).

Palabras Clave: Radar, SDR Adalm Pluto, Matlab, ThingSpeak

ABSTRACT

This academic study presents a basic radar system designed with SDR that integrates data transmission to the cloud in real time. There are currently several studies about radars, either with microcontrollers, software defined radio and new RF electronic equipment. The Radiocommunications Laboratory of the Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) needs to take advantage of the available research resources and add within its activity plan the study of the Doppler effect and the detection of radiation from the environment using software defined radio, sending the radiation information to a mobile application in real time.

Therefore, a system was designed using SDR Adalm Pluto devices, which are connected to the PC to be controlled by the virtual tool GNU Radio. The data collected from the simulation is stored in a binary file so that it is necessary to use Matlab software for reading and processing, thus taking advantage of its connection to ThingSpeak and publishing the distance through the widgets previously installed on a mobile device. Finally, it is verified that the accuracy of the radar is up to 60 cm from the origin (after the Fresnel zone).

Keywords: Radar, SDR Adalm Pluto, Matlab, ThingSpeak

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
DEDICATORIA.....	3
DECLARACIÓN EXPRESA.....	4
EVALUADORES	5
<i>RESUMEN</i>	6
<i>ABSTRACT</i>	7
ÍNDICE GENERAL.....	8
ABREVIATURAS	10
SIMBOLOGÍAS.....	12
2. Marco Teórico	25
2.1. Teoría electromagnética	25
2.2. Ondas electromagnéticas.....	27
2.3. Sistemas de Telecomunicaciones.....	28
2.4. Antena	28
2.4.1. Antena de bucle (<i>loop Antenna</i>)	29
2.4.2. Antena de bocina (<i>horn antenna</i>)	30
2.4.3. Antena parabólica	31
2.4.4. Antena Omnidireccional.....	33
2.5. Dispositivos SDR	33
2.6. Dispositivos FPGAs	34
2.7. Dispositivos USRP	34
2.8. Espectro Radioeléctrico.....	35
2.8.1. Bandas ISM.....	37
2.8.1.1. Frecuencia de 2.4 GHz.....	37
2.8.1.2. Frecuencia de 5 GHz.....	37
2.8.2. Fenómenos Electromagnéticos.....	38
2.8.2.1. Efecto Doppler.....	38
2.9. Modulación de Fase	39
2.9.1. Modulación BPSK	39
2.9.2. Modulación QPSK.....	40
2.10. Protocolos de Comunicación.....	41
2.10.1. Protocolo USB	41
2.10.2. Protocolos de internet	42

2.10.3.	Protocolo Wifi	42
2.11.	Lenguajes de Programación	43
2.11.1.	Matlab	44
2.11.2.	Python	45
2.11.3.	Arduino.....	45
2.12.	Filtros FIR.....	46
2.12.1.	Filtro Pasa Bajo.....	46
2.12.2.	Filtro Pasa Banda.....	47
2.12.3.	Filtro Pasa Alta.....	48
2.13.	Oscilador Controlado por Tensión	48
2.14.	Amplificadores	49
2.14.1.	Amplificador de Bajo Ruido.....	49
2.15.	Radar	50
2.15.1.	Radar CW.....	50
2.15.2.	Radar FMCW	50
2.15.3.	Radar FSK.....	51
2.16.	Plataformas Online para Internet de las Cosas.....	51
2.16.1.	ThingSpeak	51
2.16.2.	Plataforma Ubidots	52
2.16.3.	Plataforma IoT Core (Google Cloud)	53
3.	Diseño de la Solución	54
3.1.	Planteamiento de la Solución.....	55
3.2.	Diseño del Prototipo	57
3.3.	Diseño de la Práctica	60
3.3.1.	Materiales	61
3.3.2.	Instalación de Controladores y Librerías.....	62
3.3.3.	Diagrama de Bloques en GNU Radio.....	66
3.3.4.	Algoritmo de Matlab	68
3.3.5.	Subida De Datos A ThingSpeak.....	69
4.	Resultados	77
4.1.	Análisis de Resultados.....	79
5.	Conclusiones.....	94
6.	Recomendaciones	95
7.	Referencias.....	96
8.	Apéndice.....	102

ABREVIATURAS

CMD	Símbolo del Sistema de Windows
SDR	Software Definido por Radio
USRP	Universal Software Radio Peripheral
IOT	Internet of Things
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
LFMCW	Low Frequency Continuous Wave
UWB	Ultra-Wide Band
ADC	Analog to Digital Converter
SAR	Synthetic Aperture Radar
RF	Radio Frequency
HDL	High Description Language
VHDL	Very High Description Language
VCO	Voltage Controlled Oscillator
FFT	Fast Fourier Transform
GPR	Ground Penetrating Radar
SCR	Software Controlled Radio
ISR	Ideal Software Radio

MIMO	Multiple Input Multiple Output
USB	Universal Serial Bus
ITU	International Telecommunication Union
ISM	Industrial Scientist Medic
WLAN	Wide Local Area Network
PSK	Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FIR	Finite Impulse Response
SNR	Signal to Noise Ratio
LNA	Low Noise Amplifier
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

SIMBOLOGÍAS

cm Centímetro

mm Milímetro

s Segundo

GHz Giga Hertz

MHz Mega Hertz

° Grados

CAPITULO 1

1. Introducción

En los últimos 5 años, Ecuador ha tenido un avance considerable en el ámbito de las Telecomunicaciones, gracias al desarrollo de proyectos enfocados al despliegue de servicios TIC (Tecnologías de Informativas y Comunicativas). Ha sido posible reducir la brecha digital en la población mediante la creación de info-centros comunitarios dirigidos a sectores rurales y urbano marginales teniendo como prioridad la educación integral de niños, impulsando el conocimiento hacia nuevas tecnologías de conectividad y comunicación [1].

La población académica universitaria ha sufrido un incremento del 12.33% respecto del segundo periodo del año 2020, demostrando un interés por parte de la población juvenil en obtener un título de tercer nivel [2]. La nueva generación estudiantil demanda por parte de las IES (Instituciones de Educación Superior) una reforma constante en las mallas curriculares de las distintas carreras ofertadas que permitan estar a la vanguardia con el avance de la tecnología y el conocimiento.

La reestructuración de las mallas curriculares es un hecho en la mayoría de las carreras de la Universidad Politécnica (ESPOL), evidenciándose una reducción del número de semestres por carrera, disminución y creación de nuevas asignaturas que cumplan con los reglamentos y normas de organismos de orden mundial, como es el caso de acreditación ABET, la cual ha avalado 13 de sus carreras, siendo una de ellas la ingeniería en Telecomunicaciones [3].

La presente investigación focaliza sus esfuerzos en el estudio de nuevas tecnologías de radio definida por software (SDR) y su incorporación en la exegesis de conceptos elementales de Electromagnetismo y Propagación de ondas, proponiendo la implementación y diseño referente a un sistema de radar que facilite la comprensión del efecto Doppler dentro del

componente práctico de la materia de Propagación impartida en los Laboratorios de Radiocomunicación.

1.1. Definición del Problema

El Laboratorio de Radiocomunicaciones de la ESPOL requiere agregar dentro de su plan de actividades el estudio del efecto Doppler y la detección de radiación del entorno mediante el uso de radares de nivel terrestre, enviando la información de radiación a una aplicación móvil en tiempo real. Esto, con el fin de añadir dicha actividad al componente práctico en asignaturas relacionadas a las radiocomunicaciones.

El syllabus del componente práctico de la asignatura de Propagación [4] no detalla alguna actividad relacionada con el tema de radares o del efecto Doppler. Por otro lado, el syllabus del componente práctico de la asignatura de Diseño de Aplicaciones en Telecomunicaciones [4] si muestra actividades relacionadas con IoT, mas no aplicaciones enfocadas en monitoreo de radares como tal.

Si bien es cierto que la ESPOL cuenta con equipos de primera línea tales como los USRP 2920 y 2921, o equipos como el Adalm Pluto, antenas y programas licenciados tales como MatLab y LabView, basados en el plan de actividades de las materias previamente mencionadas [4], no se están aprovechando estos recursos para un estudio más profundo sobre radares basados en efecto Doppler. Evidentemente, dado que no existen practicas sobre el tema, tampoco se han diseñado sistemas de detección con estos equipos, que aporten a la formación del estudiantado de la rama de Telecomunicaciones.

Actualmente construir un sistema de radar de altas prestaciones resulta algo caro, solo teniendo en cuenta que un amplificador de bajo ruido como el ETTus N210 USRP tiene un costo oficial de \$2,514.00 USD [5]. Sin embargo, existen alternativas que sacrifican ciertos factores como la resolución o la potencia a cambio de ser más accesibles económicamente, partiendo de un precio no mayor a los \$400 [6].

1.2. Justificación

Hoy en día, gran parte de los sectores de la industria productiva se está volcando al desarrollo de soluciones IoT para la mejora de procesos, tanto en versatilidad, reducción de costos, tiempos de respuesta y análisis de datos. Con visión a mantenerse a la vanguardia de estas competencias, resulta menester a las universidades el vincular a sus programas de estudio nuevas prácticas relacionadas a investigaciones de tecnologías emergentes, ampliando así sus campos de aplicación [7].

Existen distintos fenómenos electromagnéticos inmersos en el ámbito de las Telecomunicaciones que demandan un alto nivel de comprensión. La consigna de esta propuesta de estudio concentra sus esfuerzos en la utilización de los recursos disponibles hoy en día en los laboratorios de la FIEC (Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación) de la universidad local para explicar de manera práctica y didáctica estos conceptos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar un sistema de radar monitoreado que sirva como recurso de investigación y herramienta didáctica en el laboratorio de Radiocomunicaciones.

1.3.2. Objetivos Específicos

-Crear una herramienta de apoyo para la comprensión de los conceptos abstractos estudiados en el campo de las Telecomunicaciones.

-Implementar un sistema de radar en 2D por medio del dispositivo análogo SDR Adalm Pluto.

- Desarrollar un código en Matlab que permita al dispositivo SDR procesar de forma dinámica las señales de transmisión y recepción de las antenas.
- Monitorear en tiempo real la detección de objetos a través de un sistema de radar por medio de una plataforma web hacia una aplicación móvil.
- Incluir dicha herramienta como parte de las practicas dentro del laboratorio de Radiocomunicaciones.

1.4. Estado del Arte

En el presente apartado se hace una revisión exhaustiva de investigaciones relacionadas al diseño de radares del tipo Doppler, ya sea mediante el uso de sistemas de matrices de puertas lógicas programables (FPGA) o de sistemas SDR (Software Defined Radio) en el ámbito educativo. Esto con el fin de analizar la influencia del estudio de los sistemas de radar, el costo que conlleva su implementación y posibles alternativas más económicas.

La ventaja de implementar sistemas de radar para aplicaciones de detección en lugar de opciones tradicionales como sistemas infrarrojos, cámaras o sistemas de ultrasonido radica en su respuesta ante escenarios climáticamente no favorables, como lluvia o neblina, ya que las ondas que parten de la transmisión del radar no sufren cambios bruscos que puedan entorpecer las mediciones [8].

Resulta importante proveer al estudiante o investigador de recursos y herramientas prácticas que le permitan comprender los distintos fenómenos electromagnéticos y el origen de parámetros físicos que se engloban en un sistema de radar sin que esto les demande un alto nivel de abstracción [9]. La inclusión de radares de onda continua modulados en frecuencia (FMCW) como herramienta didáctica para el estudio de determinados escenarios en laboratorio

es de importancia vital para el desarrollo del estudiantado a nivel técnico, teniendo en cuenta el avance a paso gigante de la tecnología y la evolución de los sistemas de comunicaciones [10].

Estudiantes de la Universidad Salesiana desarrollaron un sistema de radar de onda continua. La intención fue incluir el estudio de radares y uso de los equipos USRP 2920 como actividad de práctica dentro de los laboratorios. El sistema opera con dispositivos URSP 2920 de la mano con antenas tipo bocina para transmitir y recibir señales que posteriormente son procesadas a través de LabView para obtención de parámetros como velocidad y rango. Pese a ser un sistema sencillo, se obtuvieron resultados aceptables exceptuando el hecho de arrojar una velocidad de 0.0178 m/s estando el objeto en reposo [11]. Esto último se debe a osciladores internos del USRP que afectan en el cálculo de los parámetros.

En el 2016, la investigación realizada en la Universidad Politécnica del Chimborazo [12] relacionada también con sistemas de radar implementado con USRP tuvo un enfoque distinto, esta vez, aplicándolo al ámbito topográfico. Su función es estimar la distancia entre un transmisor y un receptor. Dentro del sistema, el bloque de transmisión /recepción está conformado por un USRP que se encarga netamente de la radiofrecuencia. En lugar de antenas se usaron cables coaxiales de distintas longitudes, logrando así una resolución de 6 metros a diferencia de lo alcanzado por su implementación con antenas que fue de solo 1 metro.

Esta nueva sociedad digital acopla ecosistemas de plataformas orientadas al internet de las cosas (IoT), y es por esto por lo que es vital la actualización de la planificación de los temas a tratar de las universidades a fin de incorporar la mayor cantidad de tecnologías relacionadas a redes de objetos interconectados a través de la internet [7]. Por lo tanto, es evidente la necesidad de renovar el material de los laboratorios en desarrollo práctico-teórico dentro del marco demandado por la sociedad de la información e industria para los próximos años.

En la actualidad existen distintos estudios acerca de radares, ya sea con microcontroladores, radio definida por software y nuevos equipos electrónicos de RF. De aquí

que existe gran variedad de aplicaciones (detección, control, monitoreo) y alcances. El estudio de “Procesamiento de radar de onda continua y pulso-Doppler basado en FPGA para aplicaciones de detección humana” [13] se analiza la utilización de (FPGA); en donde se utiliza dos tipos de radares: un radar de onda continua, donde se suprime el ruido de baja frecuencia gracias a un receptor superheterodino y un radar de ultra ancho de banda – de pulso Doppler (UWB-PD), donde se realiza un muestro de tiempo equivalente para la digitalización de pulsos estrechos.

De estos dos prototipos de radar basados en la técnica FPGA se concluye lo siguiente: los radares de onda continua resultan ser opciones de bajo coste que permiten el monitoreo, aunque limitado a una sola actividad humana (detección de signos vitales), mientras que el radar de UWB-PD resulta más efectivo, tanto para detección a través de paredes, seguimiento de objetivos en tiempo real y detección de múltiples objetos. Por lo que, respecto a la capacidad para detectar y vigilar atravesando obstáculos y a más de un objetivo humano se destaca la precisión y funcionalidad de este tipo de radar UWB-PD.

Al revisar aplicaciones de detección de signos vitales, se pudo constatar que existen estudios centrados en monitorización sin contacto de señales de respiración humana; donde se implementa un radar definido por software con características Doppler [14] de bajo coste, compacto y flexible, cuyas capacidades de aplicación pueden ser modificadas mediante software, sin ninguna intervención en el hardware.

En este proyecto se tuvo una complejidad, que era el superar los problemas críticos relacionados a la aparición de puntos de detección nulos; por lo que se optó por una arquitectura de receptor en cuadratura I/Q (Inphase/Quadrature), que se complementa con los componentes de bucle de bloqueo de fase incluidos en el transceptor, garantizando que exista la correlación de fase entre los componentes de la señal I/Q.

Referente a las alternativas económicamente viables, el estudio [15] propone un sistema de radar de imagen Ultra Wide Band (UWB), cuya ventaja es operar en tiempo real y a bajo costo. El aspecto más importante del estudio radica en la etapa de la adquisición de los datos, en donde se diseñó un módulo FPGA y convertidores analógico digital (ADC) de baja tasa o velocidad. La investigación concluye con resultados positivos, con una resolución de muestreo de 100 ps en tiempo equivalente a 100 muestras/s en tiempo real.

Por otra parte, el estudio [6] explica de manera detallada como construir un sistema de radar casero de bajo coste. Inicia por explicar los fundamentos teóricos brevemente para luego ir al diseño y construcción de la antena y el sistema modular RF. Finalmente se explica cómo obtener las imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar). El objetivo de este trabajo es incentivar a los estudiantes a la investigación y el desarrollo aplicado a sistemas de comunicaciones y procesamiento de señales. El costo final en materiales fue de \$359.96 por lo que se concluye que la propuesta es económicamente viable y aplicable para actividades de laboratorio.

Existen también cientos de pruebas experimentales con radares utilizando plataformas de radio definida por software, como, por ejemplo, un sensor de vibraciones que permite el monitoreo de estas vibraciones en tiempo real y a un bajo coste [16]. El objetivo de este estudio es el poder detectar vibraciones muy pequeñas, del orden de 0,1 mm; y que estos resultados permitan predecir su futura adopción en campos de seguridad y biomedicina.

Para probar la capacidad de detección de vibraciones del método sin contacto propuesto, se simula un sensor de radar Doppler de 1 GHz y se evalúa con éxito en objetivos a diferentes distancias, con distintas frecuencias y amplitudes de oscilación. Adicional a ello, se realiza en la practica una plataforma SDR Doppler y se ilustran las validaciones experimentales preliminares en un dispositivo capaz de producir un movimiento armónico para demostrar la eficacia del enfoque propuesto.

En los últimos cinco años, se observa que, en consonancia con los avances tecnológicos, se han introducido multitud de tipos de radar que operan en diversos espectros de frecuencia con diferentes implementaciones de hardware, considerando varios escenarios de detección y aplicando múltiples algoritmos de procesamiento de señales. El objetivo de estas investigaciones varía, desde la mejora de la precisión de la detección, la mejora de la velocidad de procesamiento, la reducción del consumo de energía, la simplificación del hardware utilizado, el recorte de los costes para implementar, y las combinaciones de ellos [17].

Los últimos avances sugieren que la investigación en este campo ha priorizado los esfuerzos en el diseño de algoritmos y arquitecturas de procesamiento adecuados para cumplir con el desafiante requisito de detección en tiempo real. Los investigadores también se esfuerzan por adquirir una mayor precisión en las mediciones, al tiempo que investigan casos de uso más prácticos, como la mejora de la distancia de detección entre el radar y el objetivo, la introducción de movimientos intencionados no deseados en las mediciones mediante la configuración del experimento en un entorno ruidoso, etc.

Para el ámbito de la vialidad, la investigación experimental [18] sugiere la implementación de radares biestáticos operando en la banda L, como alternativa a tecnologías emergentes relacionadas al control de tráfico en zonas rurales. El sistema se basa también en SDR haciendo uso de Antenas de panel operando a 2 GHz. Esta propuesta surge en necesidad de mayor control en zonas con poca presencia de agentes de tránsito. La idea pretende mitigar el índice de accidentes fatales ocasionados por exceso de velocidad.

El mecanismo de operabilidad de este sistema sienta bases en programación en LabView fundamentada en niveles de potencia en transmisión y recepción. La data de potencia en la recepción se procesa para el cálculo de distancia del objetivo, a través de sumatorias, correlación y regresión lineal. La posición del obstáculo hace variar mucho los resultados, en este caso, el

obstáculo funciona siempre a 90°. Para la comprobación de la velocidad, se ha utilizado la fórmula de la velocidad de un objeto.

Dando continuidad al tema vial, en 2010, estudiantes de la Universidad de Ontario, Canadá desarrollaron un algoritmo VHDL aplicable a FPGA para el procesamiento de señales para el cálculo de alcance y velocidad [19]. Esto se logra utilizando un radar de largo alcance que trabaja a 77 GHz LFMCW (Low Frequency Continuous Wave). Este algoritmo se encarga de generar tensión de sintonía para el control de un VCO (Voltage Controlled Oscillator) basado en GaAs (Arseniuro de Galio) para producir una señal chirp triangular y finalmente procesar la señal de FI. Este algoritmo fue trabajado para el Xilinx Virtex-5 SX50T FPGA.

En la fase experimental de esta investigación fue posible detectar hasta 24 objetivos en un tiempo de 6,42 ms en el rango de 0,4 a 200 m con una resolución de 0,19 m y un error de alcance máximo de 0,25 m. Con una velocidad relativa máxima de 300 Km/h puede determinarse con una resolución de velocidad en HDL de 0,95 m/s y un error máximo de velocidad de 0,83 m/s con una duración de barrido de 1 ms.

En el campo de aplicaciones más avanzadas relacionadas al tema de radares, el artículo [20] comenta el diseño de un procesador de radar en el que una FPGA es el núcleo, ilustrando principalmente los principios de las aplicaciones de radar, la amplificación de filtrado del procesamiento de señales de radar, el muestreo A / D, el algoritmo y la realización de FPGA de FFT, entre otros.

Los resultados muestran que: este diseño de procesador de radar tiene muchas ventajas, como un gran rango dinámico, alta precisión de procesamiento, fuerte capacidad de procesamiento, en tiempo real, de bajo costo, etc. Todas sus ventajas satisfacen en gran medida los requisitos de diseño y es adecuado para la aplicación del procesamiento de señales de alta velocidad.

Otro estudio [21] propone realizar una esquematización en el procesamiento de radar empleando arquitecturas FPGA para el análisis de funciones de ventana aplicadas a la compresión de pulsos. Esta compresión se da empleando filtros acoplados con funciones de ventanas clásicas y las denominadas ventanas atómicas, enfatizando en suprimir lóbulos laterales. A través de experimentos se concluye que obtiene un mejor desempeño ante la presencia de ruido empleando las funciones atómicas.

En el campo de Deep Learning, existen estudios interesantes que ahondan en la clasificación de señales en tiempo real haciendo uso de dispositivos como el ADALM PLUTO y USRP como el N210 [22]. Esto, a través de la detección, clasificación y caracterización de estas con el fin de hacer un uso más eficiente del espectro y dar paso al uso de la radio cognitiva con SDR y radio Smart o inteligente. El entrenamiento para lograr clasificar las señales se da por medio de algoritmos Deep Learning como la red neuronal convolucional (CNN).

Otra tecnología poco explorada por su alto nivel de complejidad de implementación tanto de hardware como de software, pero de gran potencial es la de ondas milimétricas (mmWave). Es considerada como una opción atractiva para la detección de movimiento porque permite diseñar sistemas más pequeños y precisos en cuanto al cálculo y estimación de rango u otros parámetros [23].

Evidentemente la industria militar fue la razón principal en su momento para el impulso en el desarrollo de radares. Hoy en día, el proyecto de investigación [24] alega de que es posible detectar minas terrestres por medio de drones que incorporan un sistema de radar de penetración terrestre (GPR) sustentado por dispositivos SDR, que obtiene imágenes de estructuras o cuerpos enterrados en el suelo en función de la capacidad del sistema para determinar discontinuidades del tipo dieléctrico a través del medio de propagación, que en estos casos sería el aire.

Queda claro con todo lo expuesto que, el campo de los radares ha sido bastante explorado por su gran importancia. Sin embargo, aún existe mucho potencial en cuanto a su aplicación con tecnologías emergentes como el IoT, Deep Learning, redes neuronales, IA, entre otros. Lamentablemente, es poco el talento humano verdaderamente apto para el manejo de IoT en conjunto con radares [25]. Por esta razón, su estudio en el ámbito educativo y la realización de prácticas con el uso de dispositivos SDR o USRP son de gran relevancia para el desarrollo de diferentes industrias y sectores como el vial, seguridad, medicina, ingeniería civil y muchos más campos.

En contraste con las investigaciones previamente citadas, se propone en el actual estudio rediseñar un sistema de radar a nivel terrestre, pasando de un circuito completamente analógico a uno digital y procesando la información en tiempo real desde el dispositivo SDR hacia el pc, donde se alojarán los datos resultantes en archivo de tipo binario. La frecuencia de las señales portadoras a transmitir estará en los 5 GHz. Los datos se procesan y alojan en un servidor en la nube para posteriormente ser transmitidos a la interfaz de la aplicación móvil para su visualización y tratado.

1.5. Alcance

La investigación propone como meta la inclusión del estudio del efecto Doppler como parte de las actividades del componente práctico del Laboratorio de Radiocomunicaciones, a través del uso de los equipos con los que actualmente se dispone, como el caso del dispositivo SDR Adalm Pluto, los USRP 2920, USRP 2921, antenas tipo bocina (horn), componentes como los VCO (Voltage Controlled Oscillator) y una serie de acopladores y adaptadores para cableado y antenas.

Primero, se establecerá la comunicación entre el software GNU Radio y el dispositivo SDR mediante la instalación de este software de desarrollo libre, que permite recibir la información de este dispositivo y a través de bloques de procesamiento gestionar la información entregando un valor de distancia hacia el objeto.

Segundo, se implementará un sistema de radar en 2D que permita la detección de objetos en movimiento a nivel terrestre dentro de un entorno controlado.

Tercero, se desarrollará un código de programación en MATLAB para la subida de los datos relevantes a la nube. Este código recolectará la data en tiempo real generada por el dispositivo SDR y por medio de un código API establecerá una conexión a la plataforma adaptativa ThingSpeak. Con la instalación de la aplicación en un dispositivo móvil será posible visualizar datos como el rango y la distancia, para obtener otros parámetros a través de gráficas, generadas.

Cuarto, una vez culminado el sistema propuesto se pretende diseñar una actividad de aplicación para su posterior incorporación dentro del programa de estudios del componente práctico del laboratorio de Propagación.

CAPITULO 2

2. Marco Teórico

Dentro de esta sección del presente trabajo de tesis, se hará una revisión a detalle de toda la teoría que fundamenta y permite plasmar la idea de construir el sistema de radar propuesto. Se abarcarán definiciones de Teoría Electromagnética, Propagación, Sistemas de Telecomunicaciones, Diseño de Aplicaciones en Telecomunicaciones y Programación básica con Matlab y Arduino.

2.1. Teoría electromagnética

La teoría electromagnética sienta sus bases en las expresiones matemáticas del reconocido Maxwell, mismas que unen los campos eléctrico y magnético, desarrollando variedad de aplicaciones en las comunicaciones, tecnologías de la información y la óptica, puesto que permite la transmisión de imágenes y mecanismos para el almacenamiento de datos [26].

El electromagnetismo moderno viene dado por una invención, como lo es la pila eléctrica, inventada por Volta en los años 1800, dando como resultado una fuente de corriente eléctrica continua y a su vez, dado por dos descubrimientos claves, como lo es la demostración de los efectos magnéticos por Oersted y Ampère en 1820, y la corriente eléctrica generada de “campos” y “líneas de campo” magnéticos, denominado inducción electromagnética, explorada por Faraday en 1831; en palabras de Einstein, estos resultados al crear un marco común de teorías físicas, tales como la electricidad, magnetismo y óptica, constituyen un “gran cambio en la Física” [27].

NÚMERO	ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	Expresión de Faraday Lenz (Modo diferencial)
2	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	Expresión de Ampere (Modo diferencial)
3	$\nabla \cdot D = -\rho v$	Expresión de Gauss (Campo eléctrico)
4	$\nabla \cdot B = 0$	Expresión de Gauss (Campo magnético)
5	$D = \epsilon E$	Flujo Eléctrico
6	$B = \mu H$	Flujo Magnético
7	$J = \sigma E$	Densidad de la corriente

Tabla 2.1: Ecuaciones de Maxwell.

En la **Tabla 2.1**, donde se presentan las ecuaciones de Maxwell, encontramos que: "E", expresada en Voltios sobre metro corresponde al campo eléctrico, "H", expresada en Amperio sobre metro corresponde al campo magnético, la notación "D" expresada en Coulomb sobre metro hace referencia al flujo eléctrico, la variable "B" expresada en unidades Tesla es el flujo magnético, ρv expresada en Coulomb sobre metros al cubo corresponde a la densidad de volumen de las cargas en libertad y por último, la variable "J" expresada en Amperios sobre metros al cuadrado hacen referencia a la densidad de la corriente en libertad.

La expresión matemática de la Inducción diseñada por Faraday, la cual corresponde a **1**, dictamina que, cualquier campo magnético que varíe respecto del tiempo genera un campo del tipo eléctrico de patrón solenoidal, mismo que gira de manera transversal en torno al magnético. La expresión matemática de Ampere y Maxwell, misma que responde a **2**, indica que cualquier campo del tipo eléctrico que varíe respecto del tiempo y cualquier corriente eléctrica generan un campo del tipo magnético de comportamiento solenoidal, mismo que gira de manera transversal en torno al primero.

La expresión matemática de Gauss, es decir **3**, indica que cargas del tipo eléctrico generan un campo de orden eléctrico, el cual converge o por el contrario diverge, dependiendo de la polaridad, de tal manera que, protones aportan como una fuente positiva al campo, mientras que las cargas de orden negativo hacen la función de sumideros. **4**, expresa que éste no tiene fuentes del tipo escalar.

Por último, " ϵ " expresado en Faradios sobre metro corresponde a la permitividad eléctrica, " μ " expresada en Henrios sobre metro simboliza a la permeabilidad magnética y " σ " expresada en Siemens sobre metro corresponde a la conductividad. **5,6 y 7** componen la Ley de OHM, y permiten el estudio del fenómeno electromagnético a través de un sistema de tipo lineal, con " ϵ ", " μ " y " σ " actuando como función de transferencia, como entradas o forzantes los campos de la derecha, y como salida o respuesta los de la izquierda. [28]

2.2. Ondas electromagnéticas

En el año de 1887, el científico Heinrich Hertz logró generar en pruebas de laboratorio las primeras ondas de longitud macroscópica, empleando para esto cargas que oscilan en los circuitos de tipo LC, como fuente y por medio de otros circuitos tuneados a una determinada frecuencia, el asimismo logró producir ondas de tipo estacionario y también logró medir la distancia de separación de puntos adyacentes para determinar la longitud de la onda.

Por medio del parámetro de frecuencia de resonancia en los circuitos diseñados, logró determinar la velocidad de las ondas, estableciendo la ecuación $v = \lambda \cdot f$, así fue posible verificar que era covalente con la velocidad de la luz; dando por sentada la teoría de Maxwell; entre otras cosas, el espectro radioeléctrico abarca un amplio rango de frecuencias y longitudes de onda [29]. Entre las principales consideraciones sobre ondas electromagnéticas, se tiene: (a) ondas electromagnéticas sinusoidales, (b) ondas electromagnéticas en la materia, (c) energía, y (d) ondas del tipo estacionario.

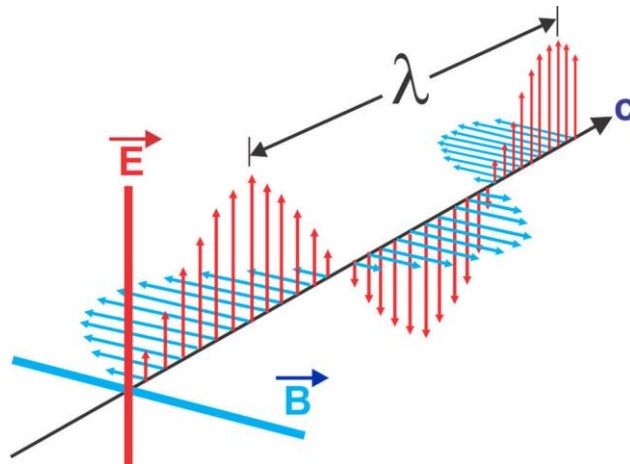


Figura 2.1: Representación gráfica de ondas electromagnéticas.

En la **Figura 2.1** se aprecia la representación del campo electromagnético, con \vec{E} representando el plano de las ondas de campo Eléctrico, \vec{B} representando el plano de las ondas del campo Magnético, λ simbolizando la longitud de la onda.

2.3. Sistemas de Telecomunicaciones

Las telecomunicaciones engloban los procedimientos que permiten hacer llegar a uno o varios destinos, datos de diferente tipo, como documentos, imágenes, videos, voz, música, señales visibles, audibles, señalización para mandos del tipo mecánico, entre otros, utilizando cualquier sistema electromagnético que permita su transmisión y/o recepción [30]. Entre los principales sistemas de telecomunicaciones se encuentran: (a) la transmisión del tipo eléctrico por medio de hilos, (b) transmisión de tipo radioeléctrica, (c) transmisión óptica, o (d) también una mezcla de los anteriores.

2.4. Antena

En términos simples, se puede decir que una antena es un elemento empleado para la conversión de las ondas transitando en una guía de ondas, un cable o por medio de una línea de transmisión en ondas que irradian y se desplazan a través del medio aéreo. El concepto también se aplica para el proceso inverso. En la **Figura 2.2**, se aprecia el desplazamiento unidimensional de los campos desde la línea de transmisión hacia el dispositivo antena para su transición de

ondas guiadas a ondas irradiadas. A través de este recorrido tridimensional, las ondas llevan consigo energía, misma que se ira disipando en función del desplazamiento por el medio aéreo [30].

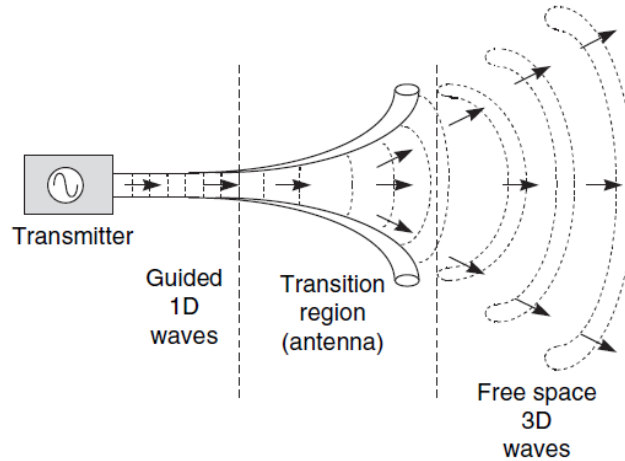


Figura 2.2: Esquema de función de una antena.

2.4.1. Antena de bucle (*loop Antenna*)

Este es un dispositivo que consiste en un sencillo alambre en forma de bucle con cierto radio R. Se considera lo suficientemente pequeño si se compara con la longitud de la onda para que así, la corriente "I" pueda ser considerada constante a lo largo de su circunferencia [30]. El patrón de radiación resultante sigue la expresión **8**:

$$H_{\theta} = -\frac{I}{r} \left(\frac{ka}{2}\right)^2 e^{-jkr} \sin \theta \quad (8)$$

Como se aprecia en **8**, esta sigue la forma del patrón del dipolo Hertziano de **9**, con la diferencia en el intercambio de papeles del campo magnético y el eléctrico respectivamente. La configuración en bucle se considera no suficiente al igual que los dipolos del tipo Hertziano. Por esta razón, se construyen diseños reducidos de tamaño y se enfocan a aplicaciones básicas. Una ventaja aplicando este diseño es la no necesidad de bucles perfectamente circulares, basta con mantener constante la superficie encerrada por el bucle, tal y como se aprecia en la **Figura 2.3** [30].

$$H_{\theta} = j - \frac{kl(0)Le^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (9)$$

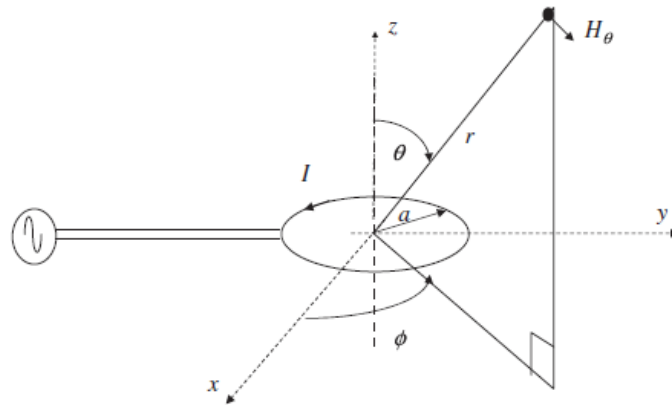


Figura 2.3: Esquema de la antena de bucle.

2.4.2. Antena de bocina (*horn antenna*)

Este tipo de antena se considera ideal para escenarios en los que las guías de ondas son la forma de alimentación del sistema, debido a que se basan principalmente en una guía de ondas cuyos extremos tienden hacia los costados tomando forma de megáfono, tal y como se observa en la **Figura 2.4**, el diseño de la boca de la bocina puede ser circular, rectangular o elíptica [30].

El control de la distribución del campo generado y resonancia deseada se da a través de las medidas de apertura de la boca de la bocina. La regla establece que a mayor longitud de la bocina respecto de su abertura de boca se obtendrá un lóbulo principal más cerrado y por consecuencia, lóbulos laterales más reducidos. Este tipo de estructura es comúnmente utilizado en sistemas satelitales, para la etapa de alimentación de las antenas de tipo plato [6].

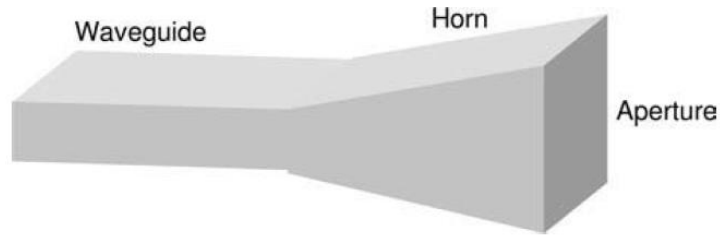


Figura 2.4: Esquema básico de una antena de bocina con apertura rectangular.

2.4.3. Antena parabólica

La antena parabólica (ver **Figura 2.5**) es una aplicación derivada de los principios de reflexión estudiados en las propiedades de las ondas electromagnéticas. La cantidad de imágenes producidas es infinita, las ubicaciones de estas se dan de tal manera que generan un haz paralelo desde la zona del reflector, si y solo si el elemento conducido se sitúa en la zona focal de la antena parabólica [30].

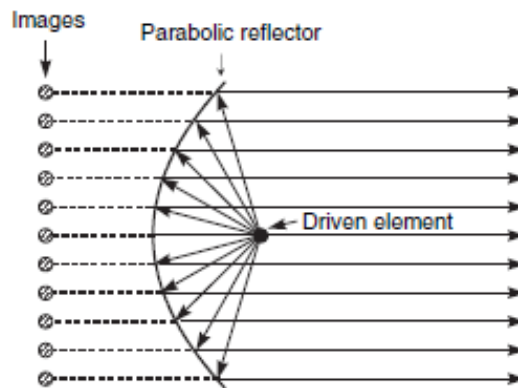


Figura 2.5: Esquema básico de una antena parabólica.

La antena actúa como un arreglo uniforme infinito, y el factor del arreglo puede ser hallado a través de **10**, fijando a 0 el parámetro alfa y el parámetro $nD = D$ respectivamente. D representa el diámetro del plato de la antena, dejando el parámetro n tendiendo al infinito. Esto da como resultado la expresión **11**:

$$F_a = \frac{\sin\left(\frac{n\psi}{2}\right)}{\left(\frac{n\psi}{2}\right)}; \psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \phi + \alpha \quad (10)$$

$$P = \frac{\sin\left(\frac{\pi D \cos \phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \cos \phi}{\lambda}\right)} \quad (11)$$

Resultado de esta expresión para distintos valores del parámetro D se muestran en la **Figura 2.6**. La ganancia puede ser incrementado básicamente de forma arbitraria aumentando las dimensiones del plato de la antena. Esto lo hace más idóneo para aplicaciones de comunicaciones de largo alcance como en el caso de sistemas satelitales [30].

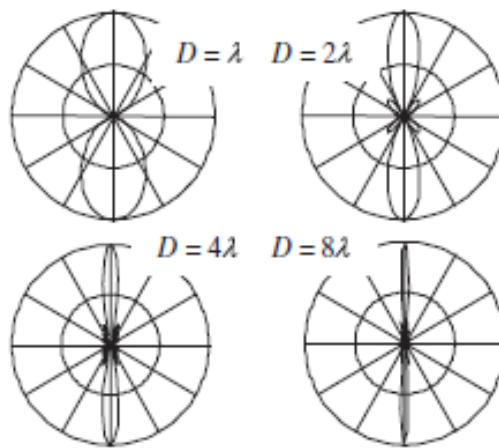


Figura 2.6: Factores de arreglo en antenas parabólicas para diferentes valores de diámetro.

La ganancia de la antena se obtiene a través de lo siguiente:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (12)$$

En **12**, η es la eficiencia de la antena como una fracción, D es el diámetro del plato en metros y la variable “ λ ” corresponde a la longitud de la onda en metros. Respecto a la eficiencia se conoce que es dependiente del material, la efectividad de la construcción del plato y los detalles en el apartado de la fase de alimentación [30].

2.4.4. Antena Omnidireccional

Se denomina antena omnidireccional a aquel dispositivo que irradia energía a través del espacio libre uniformemente. Cabe recalcar que este tipo de antena es simplemente usada como referencia conceptual, ya que en la práctica no es posible crear una antena que cumpla estas características. Sin embargo, este tipo de antena es usada como estándar o referente al momento de determinar parámetros tales como la potencia o la ganancia de otra antena [30]. La **Figura 2.7** detalla gráficamente el concepto de antena omnidireccional, mostrándolo en el plano tridimensional.

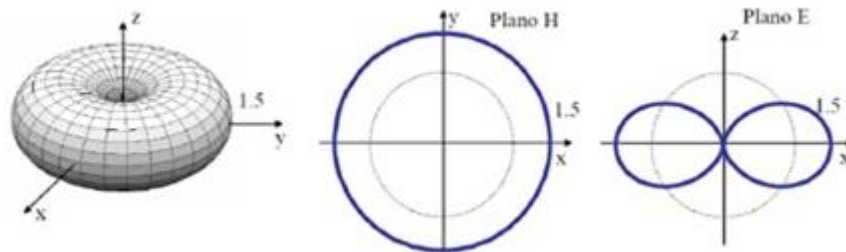


Figura 2.7: Patrón de radiación de una antena omnidireccional.

2.5. Dispositivos SDR

De acuerdo a Vega [31] los dispositivos de comunicación SDR (*Software Defined Radio*) tienen la ventaja de focalizar toda la configuración necesaria en la programación, de tal forma, que no es necesario quitar, añadir o modificar ningún componente físico de un sistema de radiocomunicación, poseen un sistema abierto y una buena estructura en lo que Arquitectura respecta, consolidándose como un sistema estable, escalable y de bloques independientes, además, existen 5 niveles que categorizan a un dispositivo SDR en función del grado de intervención tanto en los equipos como en su programación:

- Nivel 0:** Equipo carente de programación en su operabilidad, es controlado manualmente.
- Nivel 1:** Equipo con cierto nivel de programación en su diseño, determinadas funciones son realizables por programación, pero en su mayoría siguen siendo manuales.

-Nivel 2: Equipo con mayor nivel de programación para su funcionamiento. Equipos de esta categoría son denominados SCR (*Software Controlled Radio*).

Aspectos puestos de manera física como la modulación a usar, la frecuencia de la señal a transmitir se pueden manejar por programación. No obstante, el bloque de RF no es posible configurarlo de esta manera.

-Nivel 3: Equipo con las mismas cualidades de uno de nivel 2, con la diferencia de contar con modulo RF configurable a través de programación. Aquí, el apartado que es posible configurar por programación esta lo más cerca posible de zona de antena. Esta condición se conoce como ISR (*Ideal Software Radio*).

-Nivel 4: Equipos USR (*Radio por Software Definitivo*) íntegramente programables en todas sus etapas y prestaciones. Adicional a ello, tienen soporte para prestaciones simultaneas.

2.6. Dispositivos FPGAs

Los dispositivos FPGA "*Field Programmable Gate Array*", con componentes del tipo discreto en lo que respecta a la mediana y también por un componente con un nivel de integración alto " MSI " / " LSI " y de específica aplicación, cabe destacar que presenta optimización de diseño que permite manejar una lógica del tipo multinivel, lo cual permite el diseño de circuitos del tipo complejo que se contienen en un único dispositivo, aunque se tiene la desventaja de los retardos involucrados en el diseño, algo importante es que tiene un bajo costo y cuatro tipologías: (a) configurables, (b) reconfigurables y (c) completamente configurables [32].

2.7. Dispositivos USRP

Los dispositivos de RDS, comercialmente más conocidos, son las plataformas USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) de la empresa *Ettus ResearchTM*, con los cuales se han obtenido grandes alcances en varios sistemas de comunicaciones experimentales, entre los que

se pueden mencionar: analizadores de espectro, sistemas MIMO, sistemas modernos de comunicaciones analógicas y digitales, entre otros, en definitiva se trata de dispositivos robustos, potentes y flexibles, el gran inconveniente es su elevado costo [33]

Las dos clases de USRP, más reconocidas son: el USRP-1, cuya conectividad se da por puerto USB y en la actualidad ya no se encuentran disponibles; el USRP-2 tiene un puerto *Gigabit Ethernet* para la conectividad, es el más usado, por las características que posee:

- (a) De 40MHz - 50 MHz de ancho de banda de RF con muestras de 8 bits
- (b) De 20MHz - 25 MHz de ancho de banda de RF con muestras de 16 bits
- (c) Convertidor análogo – digital (ADC) de 14 bits 100MS/s,
- (d) Convertidor digital – análogo (DAC) de 16 bits 400MS/s,
- (e) Sincronización a una señal externa de reloj de 5 a 10 MHz
- (f) Capacidad MIMO [34].

2.8. Espectro Radioeléctrico

Se entiende por espectro radioeléctrico a cierta porción del ya conocido espectro electromagnético, mismo que toma frecuencias asignadas a las telecomunicaciones, los cuales de acuerdo con la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) están comprendidas entre los 3 KHz hasta los 3.000 GHz. Todo este rango se encuentra seccionado en 9 bandas de frecuencia en función del tipo de servicio debido a esto es importante conocer que el espectro es un recurso limitado, debido a que debe ser repartido entre los diferentes operadores y poder así otorgar acceso a este espectro no solamente a los servicios comerciales, también asignar parte de este recurso a la defensa y la seguridad de un determinado país [35].

En la **Tabla 2.2** se aprecia la clasificación que se le ha dado al espectro radioeléctrico en función de su magnitud de frecuencia:

BANDAS DE FRECUENCIAS							
VLF (Muy Baja Frecuencia)	LF (Baja Frecuencia)	MF (Media Frecuencia)	HF (Alta Frecuencia)	VHF (Muy Alta Frecuencia)	UHF (Ultra Alta Frecuencia)	SHF (Super Alta Frecuencia)	EHF (Extrema Alta Frecuencia)
RANGOS DE FRECUENCIA							
3-30	30-300	300-3000	3-30	30-300	300-3000	3-30	30-300
KHz			MHz			GHz	
SERVICIOS TÍPICOS							
Radionavegación Servicio Móvil Marítimo	Frecuencias Patrón	Radiodifusión Sonora en AM	Telefonía Fija o Móvil Radioaficionados Radiodifusión en Onda Corta	Telefonía Fija o Móvil Radioaficionados Radiodifusión Sonora en FM Televisión Abierta Radionavegación	Telefonía Fija o Móvil Televisión Abierta Radiolocalización	Telefonía Fija o Móvil Radiodifusión por Satélite	Telefonía Fija

Tabla 2.1: Resumen de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico.

2.8.1. Bandas ISM

La banda Médica, Científica e Industrial (ISM) es de reconocimiento internacional para las redes de área local de radio que funcionan en los bandas de los 902 MHz a los 928 MHz y también de los 2.400 GHz a los 2.473 GHz, las cuales están habilitadas para equipos inalámbricos como es el caso de teléfonos y equipos para redes WLAN, entre otros, el total de anchura de banda es de 73 MHz, conformado por 11 canales, cabe recalcar, que ciertos gobiernos no permiten la habilitación de todos los canales en este tipo de bandas libres [36].

2.8.1.1. Frecuencia de 2.4 GHz

La frecuencia 2.4 GHz es la banda más antigua de todas, incorporada en la mayoría de los dispositivos de enrutamiento, con un rango de operación entre los 2.412 MHz y los 2.472 MHz. A su vez, está dividido en 13 canales de 20 MHz, mismos que se sobreponen unos a otros, tal y como se puede visualizar en la **Figura 2.8**, el canal 14 se añadió después; otra característica es su compatibilidad amplia con equipos, y esto se aprecia en la mayoría de los dispositivos con acceso a internet inalámbrico por medio del protocolo WiFi. sin embargo, su principal desventaja es que cuenta con una baja velocidad y está muy saturada [37].

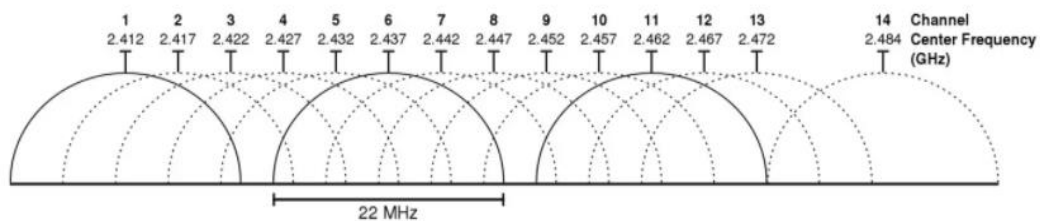


Figura 2.8: Subdivisión de canales de la Frecuencia 2.4 GHz.

2.8.1.2. Frecuencia de 5 GHz

La banda correspondiente a los 5 GHz es empleada por los protocolos Wi-Fi 5 y 6, operando entre 5180 y 5825 MHz de la banda Wi-Fi, posee una mejora en los canales pasando a 160 MHz, pese a que simplemente hayan 2 canales disponibles de 160 MHz para este rango de frecuencia, logran mejorar la conectividad Wi-Fi al duplicar la tasa de transferencia teórica y

real, ya que al mismo tiempo, integra canales de la banda de 80 MHz, ayudando a la descongestión, proporcionando altas velocidades de Wi-Fi; esta banda tiene soporte para 25 canales de 20 MHz cada uno, 12 de 40 MHz cada uno, 6 de 80 MHz cada uno y 2 de 160 MHz cada uno. Entre sus principales desventajas se encuentra su bajo poder de penetración y cobertura, ya que no todos los dispositivos son compatibles [37].

2.8.2. Fenómenos Electromagnéticos

Se denominan de esta forma a todos sucesos de origen eléctrico o magnético presentes en la naturaleza. El análisis y estudio profundo del Electromagnetismo tiene sus orígenes desde la creación del primer suministro de corriente continua, es decir, la pila, misma que vio la luz a inicios del siglo XIX, autoría del investigador Alessandro Volta. Posteriormente, en Francia el académico André-Marie Ampère junto a Hans Oersted pudieron demostrar que corrientes eléctricas generan efectos de naturaleza magnética; y a la par, Michael Faraday demuestra la posibilidad de generar flujo de corriente partiendo del magnetismo. A continuación, se realizará un breve análisis de uno de los efectos magnéticos más usados hoy en día en diferentes campos, el efecto tipo Doppler [38].

2.8.2.1. Efecto Doppler

El efecto Doppler da explicación sobre razón existente entre las frecuencias de transmisión y observadas, al generarse movimiento entre la fuente y el observador [38]. A criterio de Moreno [39] los casos que pueden darse respecto al efecto Doppler, en función del relativo movimiento entre el observador y una determinada fuente son los siguientes:

Primer Caso: fuente inerte y observador toma distancia de dicha fuente.

Segundo Caso: fuente inerte y observador se acerca en dirección a la fuente.

Tercer Caso: observador en modo estacionario y la fuente toma distancia del observador.

Cuarto Caso: observador estacionario y la fuente se acerca al observador.

Quinto Caso: fuente y observador se acercan entre sí.

Sexto Caso: fuente y observador se alejan entre sí.

2.9. Modulación de Fase

Este modelo de modulación consiste en la variación de la fase de la señal carrier, para así simbolizar las configuraciones digitales del nivel de la señal que ingresa, es decir, la señal modulante. La anchura de banda está definida conforme se aprecia en **13**:

$$B = (1 + d) * S \quad \text{(13)}$$

Este tipo de modulación es más sólida en comparación con la modulación por desplazamiento de amplitud. Esto se debe a que su susceptibilidad a los errores es nula, ya que, en la modulación de fase, un posible cambio o variación en la amplitud no afecta al proceso [40].

2.9.1. Modulación BPSK

La modulación digital PSK (por desplazamiento de fase) consiste en enviar mensajes al momento de un cambio en la fase de la señal usada como referencia o portadora. Por otro lado, en la modulación BPSK (por desplazamiento de fase binario), la data a transmitir por medio de un canal es enviada en la fase de portadora, fase de 180° usada para expresar gráficamente la data de tipo discreto, En la **Figura 2.9** se puede apreciar el diagrama de constelación de este tipo de modulación [41].

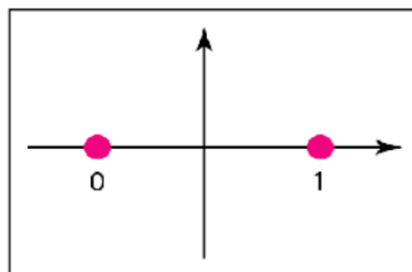


Figura 2.9: Diagrama de constelación BPSK.

2.9.2. Modulación QPSK

La modulación QPSK (por desplazamiento de fase de cuadratura) es un método ampliamente utilizado en aplicaciones celulares, TV digital, satelitales, entre otros [42]. Esta modulación implica la utilización de 4 fases, equidistantes una de otra, simbolizando los dígitos "00", "01", "11", "10", cada una de las fases transmitiendo 2 bits, el código Gray es el encargado de la asignación de bits por símbolo que se transmite, minimizando la razón de error de bits, se puede decir, que esta modulación viene siendo la suma de dos señales (BPSK) con portadoras en cuadraturas desfasadas 90°. En la **Figura 2.10** se visualiza la forma del diagrama de constelación de la modulación QPSK [41].

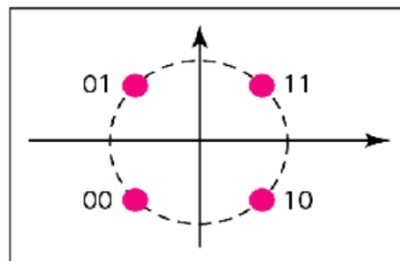


Figura 2.10: Diagrama de constelación QPSK.

Este modelo de modulación consiste en la variación de la fase de la señal carrier, para así simbolizar las configuraciones digitales del nivel de la señal que ingresa, es decir, la señal modulante. La anchura de banda está definida conforme se aprecia en **13**:

$$B = (1 + d) * S \quad (13)$$

Este tipo de modulación es más sólida en comparación con la modulación por desplazamiento de amplitud. Esto se debe a que su susceptibilidad a los errores es nula, ya que, en la modulación de fase, un posible cambio o variación en la amplitud no afecta al proceso [40].

2.10. Protocolos de Comunicación

En esta sección se puede apreciar los diferentes protocolos de comunicación que son aplicables dentro del proyecto, ya sea para las conexiones SDR-PC o PC-nube. Cabe recalcar, que los protocolos tienen sus propias reglas y estándares definidos para el intercambio de paquetes.

2.10.1. Protocolo USB

En la **Tabla 2.3**, se exponen las diferentes clases de USB y se mencionan sus protocolos:

Tipos de USB	Características
USB tipo 1.0	El protocolo más longevo, y por ende el de menor tasa de transferencia. Alcanza velocidades de hasta 1,5 Mbit/s, y es comúnmente empleado para dispositivos informáticos como ratones, teclados o cámaras web.
USB tipo 1.1	Corresponde a una ligera actualización de la primera generación. Alcanza velocidades que rondan los 12 Mbit/s.
USB tipo 2.0	Esta segunda generación del protocolo alcanza velocidades de hasta 480 Mbit/s de manera teórica, ya que en la realidad llega hasta los 280 Mbit/s. Es el estándar más usado hasta la fecha, dispone de dos pines para datos y 2 para alimentación de altas tasas de transferencia. Sirve también para cargar equipos con una potencia de 2,5 W.
USB tipo 3.0	La tercera generación alcanza velocidades de hasta 4,8 Gbit/s, siendo así 10 veces más rápida en relación con el USB 2.0.
USB tipo 3.1	Esta generación es 2 veces más rápida que su antecesor, alcanzando velocidades de hasta 10 Gbit/s. Este protocolo es empleado por los conectores Tipo C.
USB tipo 3.2	Anunciado a inicios del 2019. Ofrece velocidades de hasta 20 Gbit/s.
USB tipo 4.0	Anunciado en 2019. El USB4 ofrece velocidades de hasta 40 Gbit/s.

2.10.2. Protocolos de internet

Dentro de los modelos desarrollados a lo largo de los años para establecer una referencia fija para todos los equipos de comunicación se encuentra en protocolo TCP-IP, mismo que divide la comunicación por capas. Estas son:

Aplicación: Capa encargada de proveer acceso al usuario a los diferentes servicios de los que se dispone por medio de TCP-IP. A su vez, esta capa representa la comunicación inmediata con la siguiente capa que es la de Transporte.

Transporte: Capa encargada del suministro de comunicación y administración del flujo de la data entre aplicaciones. Divide o segmenta la data, y dichos segmentos se envían a la siguiente etapa del modelo con un identificador denominado dirección de destino.

Internet: Capa encargada de la administración de las comunicaciones que se realizan entre 2 dispositivos. Su función es aceptar o rechazar los segmentos de data provenientes de la capa anterior. En esta etapa se procede a encapsular la data y se le agrega un encabezado, tomando así el nombre de encapsulado IP.

Interfaz de red: Esta es la última capa, y está encargada de recibir los encapsulados IP. Cabe mencionar que, por lo general, esta interfaz corresponde a un controlador de software en los casos en que la red a la cual está anclado el dispositivo es una red de área local [44].

2.10.3. Protocolo Wifi

El **protocolo Wi-Fi** hace referencia a una agrupación de parámetros específicos para redes WLAN (red de área local del tipo inalámbrico), Con la norma **IEEE 802.11**, la cual prescinde

del empleo de cableado, debido a que ejecutan la transmisión de la data a través de la frecuencia por radio, lo que a su vez da pie al usuario para:

(a) hacer uso de la red en cualquiera de los puntos delimitados por la potencia de la transmisión.

(b) la rápida inclusión de otros dispositivos en la red.

(c) evita que la estructura de la edificación esté compuesta de plástico o modificadas para el tráfico de cableado [45]. La **Tabla 2.4**, presenta un resumen del protocolo Wi-Fi **IEEE 802.11**:

Nombre de protocolo	Frecuencia de operación (GHz)	Anchura de canal (MHz)	Múltiple entrada y salida (MIMO)	Tasa de datos teórica (Gbps)
802.11 ax	2,4 – 5,0	20 / 40 / 80 / 160	Múltiple usuario	2,4 ¹
802.11 ac wave2	5,0	20 / 40 / 80 / 160	Múltiple usuario	1,73 ²
802.11 ac wave1	5,0	20 / 40 / 80	Un usuario	0,8667 ²
802.11 n	2,4 – 5,0	20 / 40	Un usuario	0,450 ³
802.11 g	2,4	20	N/A	0,054
802.11 a	5,0	20	N/A	0,054
802.11 b	2,4	20	N/A	0,011
Tradicional 802.11	2,4	20	N/A	0,002

Tabla 2.4: Componentes de los protocolos Wi-Fi [46]

¹ dos transmisiones de tipo espacial moduladas en 1024 QAM.

² dos transmisiones de tipo espacial moduladas en 256 QAM.

³ tres transmisiones de tipo espacial moduladas en 64 QAM.

2.11. Lenguajes de Programación

El lenguaje de programación hace referencia a la forma de comunicación que existe entre el usuario y el dispositivo electrónico (pc, tablets, celulares, etc). Esta comunicación se emplea para indicarle a través de instrucciones (que pueden ser símbolos y sintaxis) lo que el usuario desea hacer.

Estos algoritmos definen la estructura y desarrollo lógico de un programa, siendo herramientas importantes en el desarrollo de aplicaciones a nivel informático y de dispositivos electrónicos programables en general.

2.11.1. Matlab

MATLAB es una herramienta de ordenador enfocada a realizar cálculos por medio de matrices (de ahí proviene su nombre) disminuyendo así gran parte de los algoritmos usados para la resolución de ejercicios Cálculo aplicado. Ofrece una interfaz amigable con el usuario por medio de una ventana de interacción para ingresar parámetros y posteriormente obtener resultados [47]. Cada ventana tiene un menú que controla su funcionalidad, entre las principales cualidades de esta herramienta destacan su capacidad en el apartado gráfico y también que posee comandos al nivel de un lenguaje de programación a la hora de realizar "loops" y "splits" con condicionantes. Para finalizar, realiza la ejecución de los comandos alojados en ficheros almacenados en código ASCII, a través del uso de un editor de texto cualquiera [48]. En la **Figura 2.11** se aprecia cómo es el entorno una vez ejecutado la herramienta virtual.

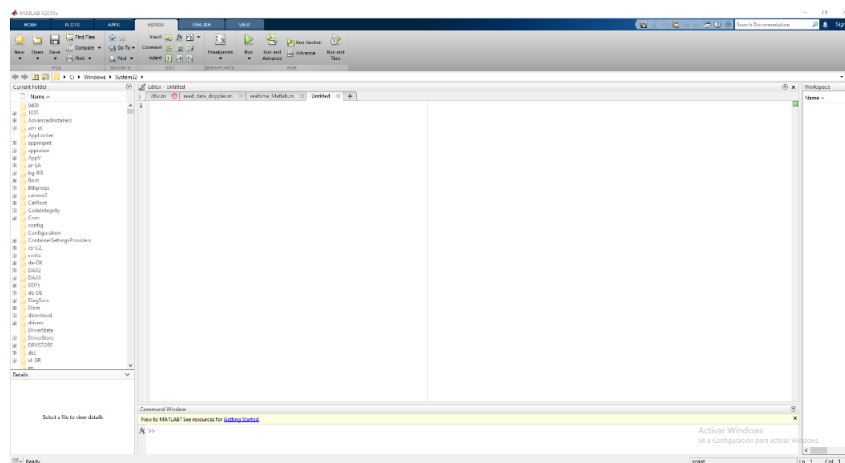


Figura 2.11: Interfaz de inicio en Matlab.

2.11.2. Python

Python ha calado fuerte en la comunidad científica, en el sector de la docencia y en los grupos desarrolladores de herramientas virtuales de licencia gratuita debido a su fácil uso y también por su amplia compatibilidad para ser usado como herramienta de solución a problemáticas reales [49]. Este lenguaje, al igual que muchos otros dispone de un apartado llamado consola, mismo que da la posibilidad de testear las prestaciones propias del lenguaje sin la necesidad de editar o generar un módulo, también es posible usarla como una poderosa calculadora, su mayor fortaleza radica en la librería denominada estándar basada en lenguaje C, misma que dispone de un catálogo amplio de módulos que permiten cubrir la mayor parte de las necesidades elementales de editor de programación; la eficiencia de sus funciones fundamentales se debe a esta simplicidad [50]. En la **Figura 2.12** se observa el entorno gráfico de Python corriendo en modo nativo.

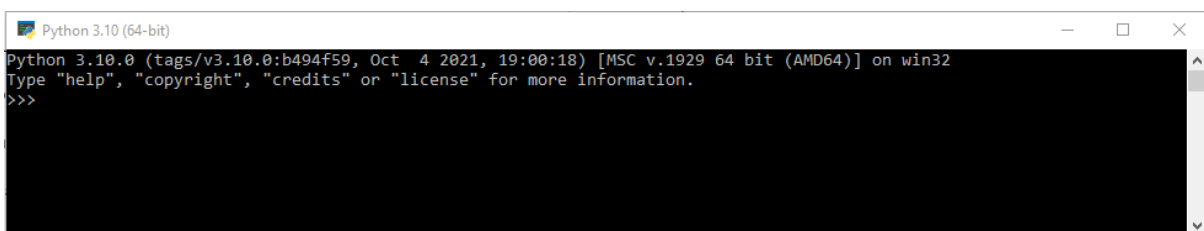


Figura 2.12: Interfaz de inicio en Python desde la herramienta de comandos.

2.11.3. Arduino

Se incluye en el concepto de *hardware* y herramienta virtual de licencia libre, de difusión, uso y desarrollo abierto, al ser una interfaz orientada al prototipado electrónico, consistiendo en una placa de desarrollo, con lenguaje de programación que soporta el flujo de datos y señales [51]. Las unidades de procesamiento de dichas placas operan a través de ATMEL, usando un cargador de arranque preinstalado que establece la comunicación entre los comandos y el dispositivo físico de Arduino [52]. A continuación, en la **Figura 2.13** se puede visualizar la apariencia de inicio del software.

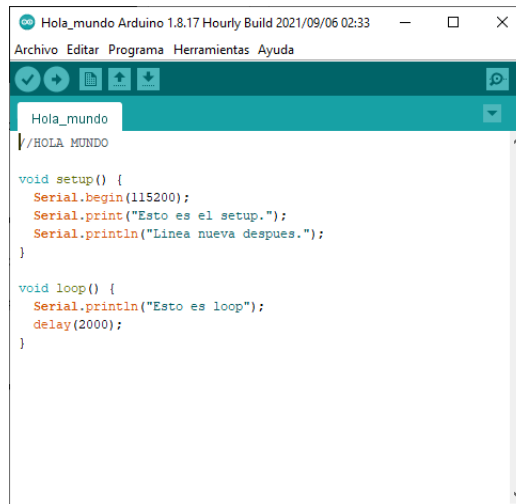


Figura 2.13: Interfaz de inicio en Arduino.

2.12. Filtros FIR

Respecto al filtrado digital existen los de respuesta finita e infinita. En este estudio se abarca los filtros de respuesta finita (FIR). Su ventaja frente al otro tipo de filtrado radica en la estabilidad, linealidad en lo que respecta a sus fases y metodología de diseño, esto facilita su adaptación en dispositivos. Como punto en contra es el factor de retardo, el cual es más alto en comparación con los filtros de respuesta infinita. A continuación, en la **Figura 2.14** se muestra un esquema elemental de un filtro FIR [53].

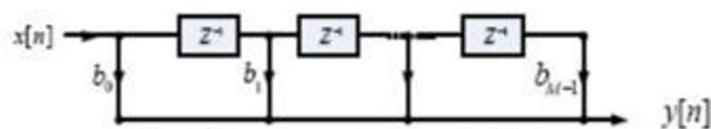


Figura 2.14: Esquema estructural filtro FIR.

2.12.1. Filtro Pasa Bajo

Los filtros paso bajo permiten el paso de señales que sean menores al de una frecuencia de referencia o corte y atenúa o restringe a las señales que operen sobre dicha frecuencia de referencia, los filtros con media móvil son empleados en la limpieza de señales, supresión del ruido, suavizado, cálculo de promedio de la data, decimación e interpolado, generando así

cambios de a poco en los valores salientes con el fin de facilitar el observar las tendencias e incrementar aumentar la señal en proporción el factor señal-ruido (SNR) degradando la señal con un mínimo impacto sobre ella [54]. Los filtros de respuesta finita son de utilidad para aplicativos de seguridad como biometría, el mundo del audio, sistemas de radar, entre otros. Los métodos empleados mayormente son:

- (a) ventana de Kaiser.
- (b) mínimos cuadrados.
- (c) rizado constante [55].

La **Figura 2.15**, detalla las especificaciones de un filtro de tipo paso bajo, señalando la banda de paso, la banda transitoria y la banda de rechazo.

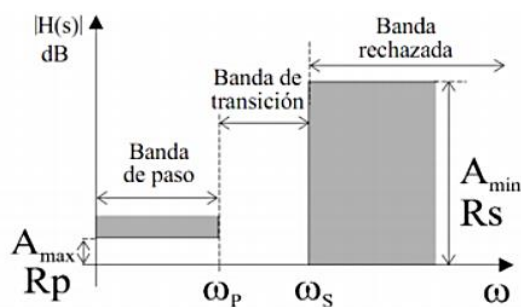


Figura 2.15: Características de un filtro pasa bajo [56]

2.12.2. Filtro Pasa Banda

Un filtro pasa banda se presenta cuando las señales que se han transmitido se hallan por encima y debajo de la primera y segunda frecuencia de corte respectivamente, lo cual indica que filtros de estas características conservan 2 bandas en zona de rechazo, una superior e inferior respectivamente, mismas que generan la banda de paso y exclusivamente va a permitir

el paso de las frecuencias en el rango previamente definido [56], sus características se ilustran en la **Figura 2.16**.

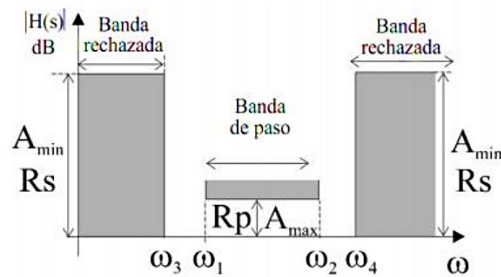


Figura 2.16: Características de un Filtro Pasa Banda [56]

2.12.3. Filtro Pasa Alta

A diferencia del filtro pasa bajo, en este se admiten las frecuencias altas y repele frecuencias bajas en su banda de rechazo, permitiendo el paso de señales por encima de su frecuencia de zona de corte [56], como se observa en la **Figura 2.17**.

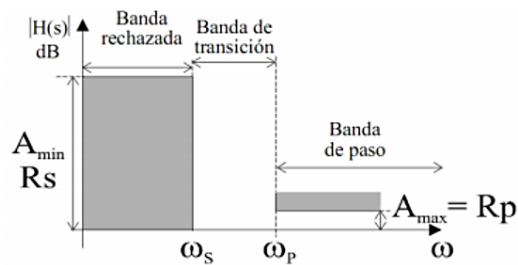


Figura 2.17: Características de un Filtro Pasa Alta [56]

2.13. Oscilador Controlado por Tensión

Un oscilador es un sistema que proporciona una señal periódica de RF (entre algunos kHz y centenares de GHz) a partir de una fuente continua de alimentación, los VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) son osciladores sintonizables electrónicamente, entre los que se pueden distinguir varios tipos: (a) Multivibrador: con frecuencias de unos pocos MHz y se basan en un

circuito multivibrador digital en el que la frecuencia de oscilación puede variarse por medio de una tensión continua que controla, poseen una estabilidad mala pero en cambio ofrecen márgenes de variación de frecuencia muy grandes, 10:1 y superiores; (b) Osciladores con varactor: incluyen un diodo varactor (varicap) en el circuito, de forma que al configurar su capacidad con diferencia de potencial continua, la frecuencia a la que oscila cambia, debido a que el factor de calidad de los varactores es bajo, no ofrecen una alta estabilidad y se obtienen márgenes de sintonía del orden de una octava como máximo y (c) Osciladores de cavidad compuesta de *Granate ferroso de Itrio* (YIG): Son osciladores generadores de ondas en el orden de las micras que emplean una cavidad de naturaleza ferrosa magnética cuyas características son dependientes del campo magnético de polarización, permiten variaciones amplias de la frecuencia (del 30 al 60%) en bandas de microondas (de 500 MHz a 20 GHz) [57].

2.14. Amplificadores

Esta clase de componentes son usados de manera extensa en sistemas de comunicaciones de tipo inalámbrico. El amplificador enfocado a potencia se localiza en la etapa saliente de un sistema de transmisión y su tarea (como su nombre lo indica) se basa en incrementar la magnitud de la potencia que se emite. Su aplicación en las telecomunicaciones hoy en día es indispensable, y su uso va de la mano con la energía consumida por el sistema. A continuación, se dará una explicación breve sobre los amplificadores de bajo ruido (LNA) [58].

2.14.1. Amplificador de Bajo Ruido

Constituye el primer dispositivo electrónico con el que las señales receptadas por la antena (RX) se encuentran, lugar en el cual se genera poco ruido, ruido que se adiciona a las señales de origen y son amplificadas por el sistema [59]. Un amplificador con bajo ruido (LNA) constituye una pieza fundamental en el desempeño de cualquier receptor, puesto que amplifica en primera instancia señales con magnitud casi despreciable, intentando adicionar el menor ruido que se pueda, razón por la cual, un buen esquema de diseño depende del conocimiento

del dispositivo, que tiene foco en los parámetros *scattering* (S) y a su vez tener en cuenta los parámetros de ganancia, estabilidad, anchura de banda y ruido que conlleva a un correcto esquema de las redes de acople, en la zona entrante y saliente del transistor, y de igual manera el apartado de polarización [60].

2.15. Radar

El radar es un dispositivo que emplea radiación electromagnética de reflexión por cierto cuerpo u obstáculo para definir dónde se localiza o cuál es su velocidad, este tipo de sistemas tiene la capacidad de determinar parámetros de altura, distancia, rumbo, dirección, rapidez partiendo del eco proveniente del reflejo en objetos inertes y en movimiento. Un radar puede ser categorizado en función de la cantidad de antenas: (a) Mono estático, solo una antena para transmisión y recepción, (b) Bi estático: una antena para transmitir y otra para recibir y (c) Multi estático: se combina la data que se percibe a través de varias antenas [61].

2.15.1. Radar CW

Un radar de onda continua CW, transmite ininterrumpidamente y detecta parámetros de rapidez por medio del efecto Doppler [62]. Esto se debe a la carencia de referencia de tiempo, no pueden medir la distancia, no obstante, puede obtenerse modulando la frecuencia de la señal que se transmite, emitiendo una onda que varía su frecuencia de forma periódica, de recibirse una señal tipo eco, se produce un retraso en el tiempo debido a la modificación de la frecuencia al igual que un sistema de radar por pulsos [63].

2.15.2. Radar FMCW

El radar FM-CW tiene una señal transmitida que se halla modulada por su frecuencia, la capacidad de medición de las distancias se da por esta modulación, porque internamente fija una referencia temporal, usualmente, en estos sistemas se emplean 2 clases de señales modulantes: La primera, el diente de sierra y la segunda, la triangular; el mecanismo de operación de estos dispositivos se describe a continuación: se emite una señal que varía su

frecuencia de manera periódica y se reciben los ecos que otorgan datos importantes acerca de la zona que se ilumina, evidentemente esto se logra si la señal es correctamente procesada [61].

Dentro de las cualidades de este tipo de radar destacan las siguientes: (a) capacidad y resolución al medir a qué distancia se encuentran objetos sabiendo que dichas distancias son muy cortas, (b) precisión para medir distancias, (c) procesamiento de las señales se ejecuta a frecuencias bajas posterior al mezclado, recortando significativamente al circuito. (d) confiabilidad de operación gracias a la falta de pulsos de potencias elevadas [63].

2.15.3. Radar FSK

Los sistemas de radar de manipulación por el desplazamiento del parámetro de la frecuencia (FSK) se basan en el radar CW, pero transmiten dos o incluso más en el tiempo alternando señales no moduladas en diferentes portadoras de frecuencias con una diferencia de frecuencia f_{shift} [64]. Este radar puede resolver en frecuencia Doppler y medir el rango. Se utilizan para una detección de rango de alta precisión basada en el factor de diferencia existente de fase entre las señales que se transmiten y se reciben obtenidas por separado a más de dos frecuencias de funcionamiento [65].

2.16. Plataformas Online para Internet de las Cosas

El cada vez más conocido IOT (Internet de las Cosas) es una definición que hace referencia a la interconectividad de tipo digital de los dispositivos habituales que cuentan con internet. En la actualidad existen plataformas IoT que se encargan de generar un entorno digital entre los dispositivos y sensores dentro de una red que puede ser de tipo industrial o para hogares.

2.16.1. ThingSpeak

El cada vez más conocido IOT (Internet de las Cosas) es una definición que hace referencia a la interconectividad de tipo digital de los dispositivos habituales que cuentan con internet, la plataforma "ThingSpeak" es un entorno que permite el almacenamiento y

recolección de data empleando a HTTP como protocolo por medio del Internet o de una red LAN, de igual manera hace más fácil crear aplicaciones para registrar dispositivos sensores, localizar posicionamiento y también una network con avisos acerca de datos actualizados de estado; es idóneo para la interacción con software como MatLab, dispositivos Arduino, entre otras plataformas [66]. Con ThingSpeak es posible analizar online e interactuar con la data, la información del sensor puede ser emitida a ThingSpeak por medio de cualquier dispositivo con

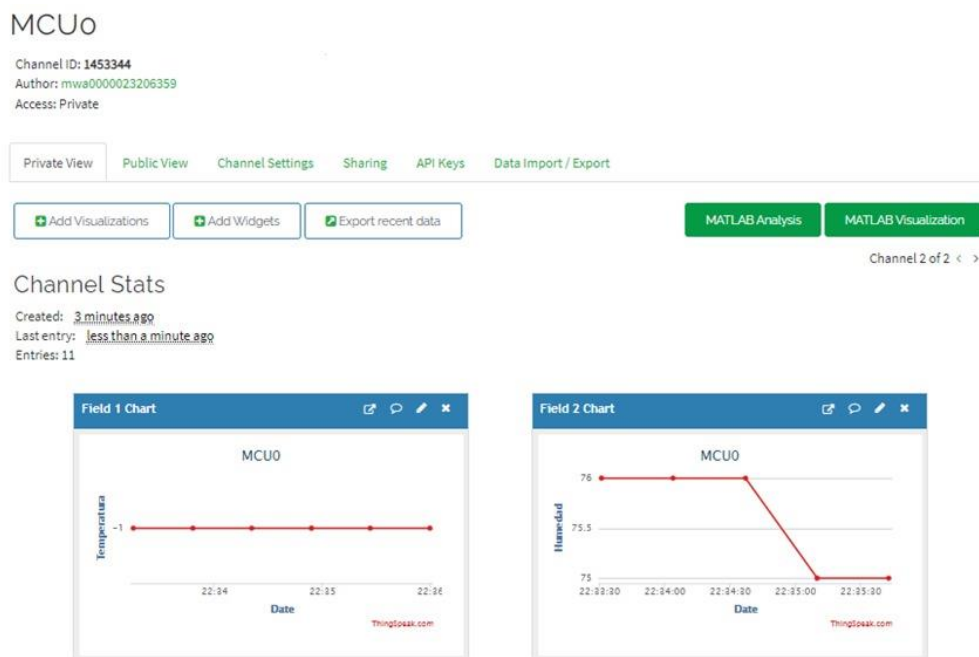


Figura 2.18: Interfaz de ThingSpeak.

la capacidad de comunicarse empleando API de tipo REST o empleando el protocolo MQTT, específicamente ideado para equipos con anchura de banda restringida y latencia elevada [67].

La **Figura 2.18** muestra a detalle cómo se ve la interfaz de la plataforma.

2.16.2. Plataforma Ubidots

Ubidots es una herramienta de computación basada en la nube (gestiona los recursos computacionales a través de ella), es una infraestructura como Servicio (IaaS por sus siglas en inglés) apta para ser usada en desarrollar apps para IoT, Una de sus ventajas en el poder

almacenar e interpretar la data que se suba de forma instantánea, conectando equipos a través de bibliotecas integradas en la plataforma; sólo por mencionar unas cuantas se encuentran Microchip, Texas Instruments, entre otros [68].

Entre sus fortalezas destaca: (a) Poder publicar la data del equipo sobre una API de tipo REST, (b) Posee flexibilidad, permitiendo al usuario combinar distinta data y presentarlos en la interfaz, (c) Su disponibilidad ya que está fundamentada en la nube y (d) Es un entorno seguro ofreciendo métodos de autenticación por medio de API o también por medio de tokens [67].

2.16.3. Plataforma IoT Core (Google Cloud)

Plataforma que permite conexión y gestión de data de cientos de miles de equipos desplegados globalmente de manera simple y segura, conformando un sistema mundial único integrado con todos los servicios propios de la nube de Google [69]. Su uso tiene grandes ventajas como la rapidez y la escalabilidad de su infraestructura, es mayormente utilizada por arquitectos y desarrolladores softwares especializados en Java y Python [70]. La **Figura 2.19** muestra un ejemplo de cómo luce el panel de software de Google de la nube.

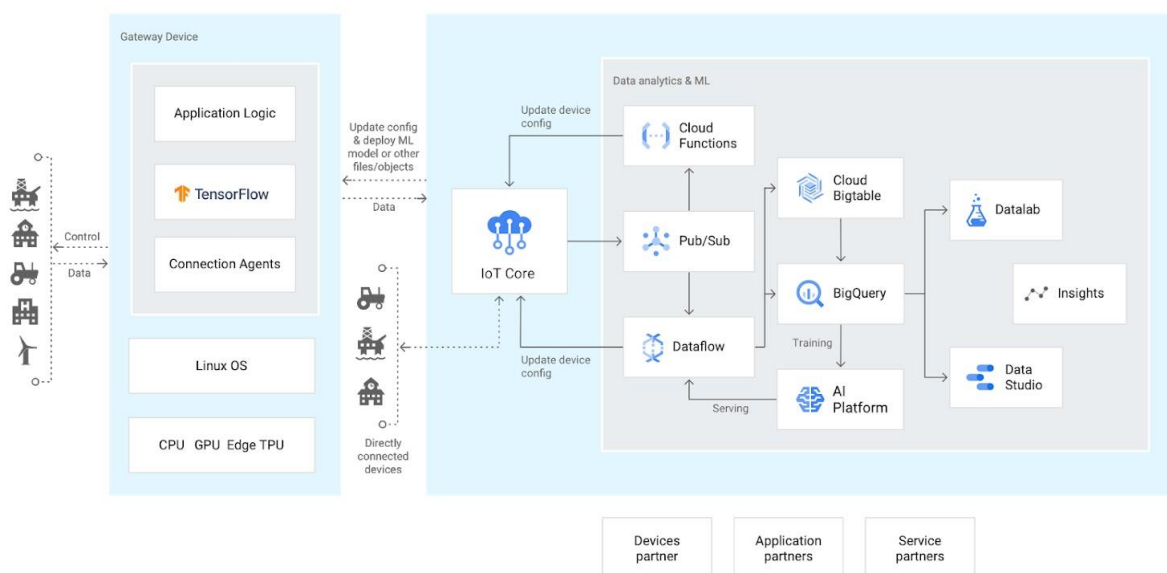


Figura2.19: Interfaz de Google Cloud IoT Core [69]

CAPITULO 3

3. Diseño de la Solución

En esta sección se pretende explicar paso a paso el diseño de la solución propuesta, partiendo de un diagrama de bloques general, explicando los principios de operación del sistema a construir, tomando en consideración los fundamentos teóricos revisados en el capítulo anterior del presente trabajo de investigación. Posterior a ello, a través del uso de un diagrama de flujo y de un diagrama de bloques detallado se explican a detalle las distintas etapas del sistema propuesto, comenzando por el radar mismo, pasando luego a la plataforma en la nube para finalizar con la visualización de los parámetros de interés en la pantalla de un dispositivo móvil.

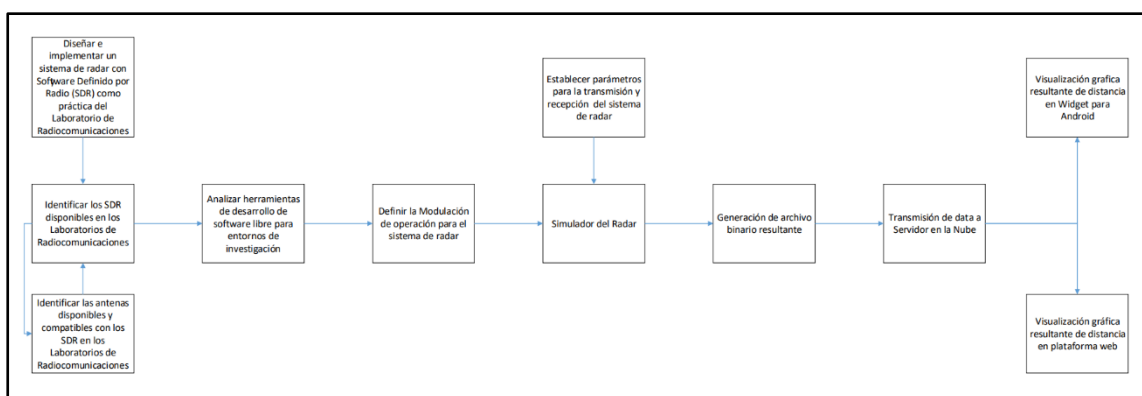


Figura 3.1: Diagrama de flujo del diseño de la solución propuesta

A través del presente diagrama de flujo (ver **Figura 3.1**) se establece como primer paso el objetivo principal del trabajo, que es la construcción de un sistema de radar que sirva de herramienta didáctica para el aprendizaje de los estudiantes del laboratorio de radiocomunicaciones. Como siguiente etapa del flujo está el analizar con qué equipos cuenta el laboratorio para la realización del proyecto, entendiéndose como equipos a los dispositivos de comunicación del tipo FPGA, USRP, SDR, así como también de las antenas, adaptadores, cables, entre otros. Una vez culminada esta etapa, se procede con el estudio de los programas de uso libre disponibles en la red para gestionar todo el hardware seleccionado en el paso anterior.

Afortunadamente, se dispone un diverso catálogo de opciones en cuanto a software se refiere, como es el caso de MatLab, LabView, Python, GNU Radio o Arduino, solo por mencionar unos cuantos. Una vez elegidas las herramientas virtuales para configurar el sistema, se procede entonces con la construcción del prototipo, conectando los diferentes componentes y configurando los correspondientes parámetros de transmisión y recepción. Es justo en este punto que es posible realizar pruebas de funcionamiento para verificar posibles errores y poder corregirlos en caso de existir, caso contrario, al finalizar la prueba se espera la generación de un archivo de tipo binario en el ordenador con los datos resultantes del experimento.

Ingresando ya a la parte final del diagrama, se encuentra la etapa de transmisión de los datos hacia la plataforma en la nube, misma que de manera casi simultánea va a permitir la lectura o visualización de los resultados de manera remota, ya sea, a través de otro computador o de una Tablet o teléfono inteligente. A breves rasgos, y sin elegir aun ningún equipo en específico, esta es la ruta planificada para la realización del sistema propuesto.

3.1. Planteamiento de la Solución

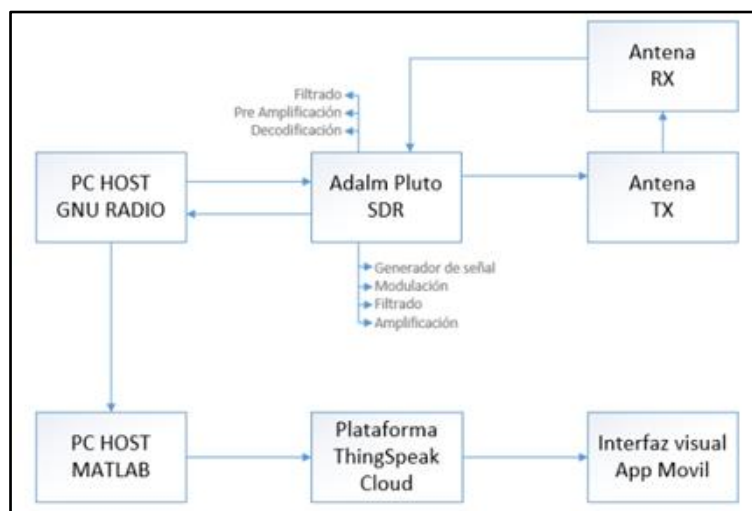


Figura 3.2: Diagrama de bloques básico de la solución propuesta.

En la **Figura 3.2**, se expone a manera de resumen los componentes básicos del sistema de radar. En primer lugar, se adopta el sistema de radar de onda continua por multiplicación de frecuencias (MFCW) en lugar del sistema de radar de onda continua por modulación de frecuencia (FMCW). Esta decisión se ha tomado en función de que un sistema FMCW demanda mucha potencia y no es factible para aplicaciones de corto alcance. Por otro lado, el sistema MFCW permite trabajar en banda estrecha, lo que ahorra en gran manera el consumo de energía requerida para su operatividad, además de que si es aplicable para el escenario objetivo del presente trabajo.

Para la primera etapa de la propuesta, como dispositivo generador y receptor de las señales se opta por emplear el dispositivo Adalm Pluto, sistema definido por radio que simplifica el diseño y la construcción del prototipo, ya que dentro de sus circuitos se encuentran todas las etapas y componentes necesarios para el procesamiento elemental de las señales que se envían y que se reciben. En cuanto al apartado de diseño se escoge a la herramienta virtual GNU Radio, ya que gracias a su interfaz sencilla y su sistema de construcción por bloques facilita enormemente la creación del sistema propuesto, además de que posee librerías que permiten la comunicación con dispositivos SDR Pluto.

Para la segunda etapa del presente trabajo, se ha escogido a la plataforma ThingSpeak, por sobre alternativas como Ubidots o Google Cloud. Por medio del protocolo TCP es posible establecer comunicación y transferencia de la data entre GNU Radio y ThingSpeak. La idea se centra en guardar la data recolectada de la simulación en los canales de esta plataforma para, de manera simultánea poder acceder a esta información a través de los widgets propios de ThingSpeak previamente instalados en un dispositivo móvil.

3.2. Diseño del Prototipo

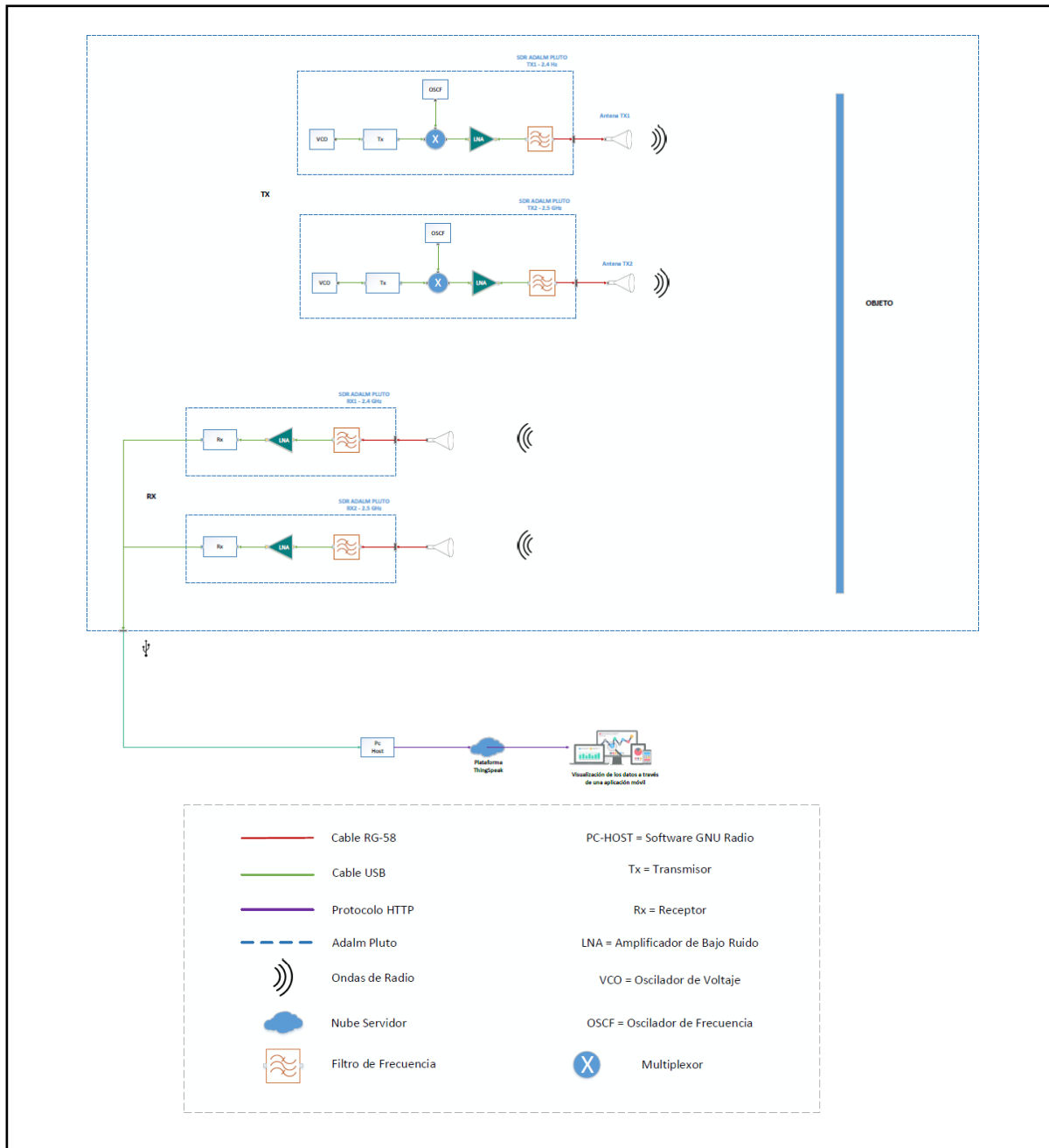


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la solución propuesta.

Como se observa en la **Figura 3.3**, el diseño de la solución del sistema de radar permite obtener la distancia de un objetivo a través de ondas electromagnéticas. En este caso, la generación de las ondas, la configuración de los parámetros (frecuencia, ancho de banda, muestreo, etc.) se realiza en el SDR Adalm Pluto (recuadro de líneas), mismo que destaca en su versatilidad por sus canales independientes tanto en la transmisión como en la recepción,

otorgando una funcionalidad full dúplex y su fácil conexión con computadoras a través de comunicación USB.

El circuito del Adalm Pluto en su etapa de transmisión genera una señal controlada mediante un módulo VCO, para luego ser amplificada por un amplificador de bajo ruido (este es necesario para poder transmitir señales que llegan con niveles bajos de potencia), esta señal es procesada y filtrada después de la mezcla antes de llegar a la antena de transmisión. Las ondas generadas en el Tx mantienen una frecuencia de operación, esta señal llega directamente al circuito receptor para generar la comparativa (referencia) entre la señal enviada y la recibida.

La distancia es calculada al considerar el tiempo que le toma a la onda proveniente del Transmisor en reflejarse en el Receptor, es decir, una parte de la onda generada golpea sobre una superficie reflectante y es devuelta en diferentes sentidos, una parte de esta onda reflejada es captada por la antena receptora, filtrada y amplificada para poder ser comparada con la señal proveniente del Tx, con esta diferencia de frecuencia obtenida, se puede obtener valores de distancia y tiempo.

Para la revisión de esta data se añade el uso de una herramienta abierta para sistemas de SDR como lo es el GNU Radio, este software facilita la creación de sistemas de radio a través de bloques configurables en tiempo real. En este caso, las señales tanto de Tx y Rx llegan a la interfaz de GNU Radio, donde se realizan los cálculos de distancia a través de la diferencia de fase obtenida. Esta data resultante llega a una plataforma web informativa conocida como Thingspeak, misma que puede instalarse como un widget en terminales Android y así mantener información relevante en tiempo real y de fácil alcance.

Más adelante se plantea el uso de dos dispositivos SDR Adalm Pluto, donde se duplica este sistema con la finalidad de generar ondas a diferentes frecuencias y calcular su diferencia de fase multiplicando las conjugadas y así visualizar dos interfaces de onda donde se podrá observar el crecimiento de la diferencia de fase entre las dos frecuencias.

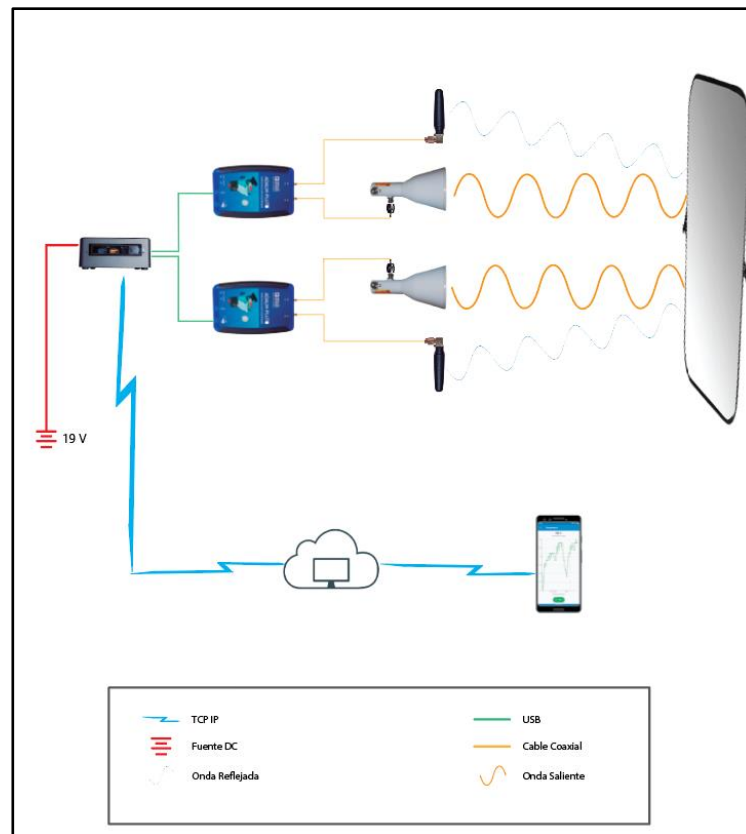


Figura 3.4: Diagrama de conexiones del sistema de radar.

Como se aprecia en la **Figura 3.4**, el sistema dispone de una configuración de 2 dispositivos SDR conectados a un ordenador a través del protocolo USB 2.0 de manera alámbrica. A su vez, el ordenador se encuentra energizado con una fuente de alimentación de 19V, necesarios para su funcionamiento. Las antenas tipo bocina van conectadas al puerto Tx del SDR por medio de un cable coaxial con rosca SMA, y cabe mencionar que es necesario el uso de un adaptador que permita la conexión del cable coaxial con las antenas tipo bocina. También se visualiza la conexión de las antenas tipo "whip" a través de cable coaxial al puerto Rx del dispositivo SDR, esta vez, sin necesidad de adaptadores.

También es posible visualizar la conexión inalámbrica del ordenador a la red de internet para tener acceso a la plataforma en la nube y poder así enviar la data de los resultados obtenidos en la simulación. Para finalizar se obtiene el registro de la data a través de la aplicación móvil desde un smartphone Android.

3.3. Diseño de la Práctica

En esta sección se pretende explicar a través de un diagrama de flujo el proceso que conlleva la realización de la práctica, que es parte de la solución del presente trabajo investigativo.

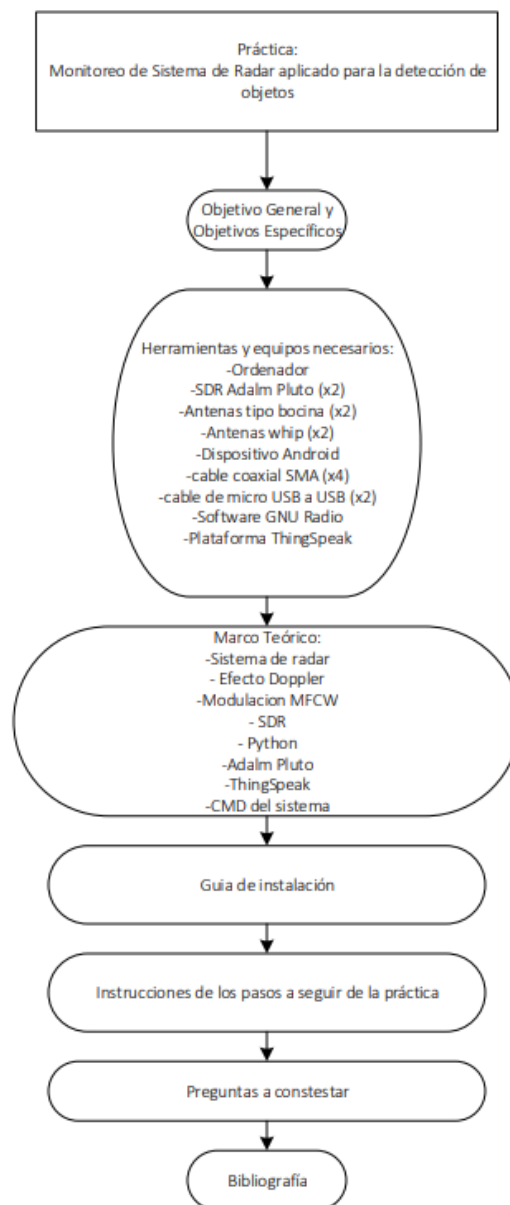


Figura 3.5: Diagrama de flujo del proceso de la práctica.

Una vez diseñada la solución, generado el prototipo, es posible ahora establecer una propuesta de actividad para las prácticas que se realizarán en el laboratorio de Radiocomunicaciones, para ello se ha realizado una hoja de ruta a manera de diagrama de flujo

(ver **Figura 3.5**), explicando los pasos a seguir para la explicación del efecto Doppler y otros conceptos relacionados a través de la construcción de un sistema de radar.

Como primer punto se encuentra la descripción y análisis de los objetivos general y específicos respectivamente, estableciendo en esta etapa la razón e importancia del estudio del efecto Doppler y sus aplicaciones en el día a día, tanto en la sociedad como en el campo científico. En la siguiente etapa se enlistan los componentes necesarios para la realización de la práctica, tanto de hardware como de herramientas virtuales. En tercer lugar, se hace una breve revisión de los conceptos y teoría elemental necesaria para la realización del presente trabajo.

Como cuarto punto, se explica paso a paso tanto la instalación y armado del sistema de radar, como su conexión al ordenador y configuración necesaria para la ejecución respectiva. En quinto lugar, se explican los parámetros que deben establecerse para obtener los resultados esperados. Posterior a la ejecución de la simulación, se procede a la sección de preguntas, mismas que deben ser respondidas en función de los resultados obtenidos. Finalmente, se encuentra la sección de Bibliografía, en donde se encuentran las diferentes fuentes citadas para la realización del trabajo práctico.

3.3.1. Materiales

A continuación, se dará una explicación general de los pasos a seguir dentro de la práctica de laboratorio. En primer lugar, se requiere lo siguiente:

- Computador de escritorio o laptop.
- Dispositivo móvil con sistema operativo Android.
- Herramienta virtual GNU Radio versión 3.7.13.4.
- Herramienta virtual Python versión 3.7 o superior.
- Dispositivo SDR Adalm Pluto (2 unidades).

- Archivo ejecutable " PlutoSDR-M2k-USB-Drivers versión 0.8".
- Archivo ejecutable " Libiio versión 0.23".
- 2 antenas tipo bocina o "horn".
- 2 antenas tipo "whip".
- 2 cables rg58 con conexión SMA.
- 2 cables con conexión de micro USB tipo B a USB tipo A.
- Conexión a internet.

3.3.2. Instalación de Controladores y Librerías

Como primer paso, se requiere la instalación previa en el computador de las herramientas digitales Python y GNU Radio (ver **Figuras 3.6 y 3.7**) en las versiones indicadas para evitar problemas de compatibilidad. En caso de no encontrar la versión solicitada debido a que el soporte de GNU Radio para la plataforma de Windows ya no está disponible, se aconseja descargar de otras fuentes el archivo ejecutable "gnuradio_3.7.11_iiosupport_win64".

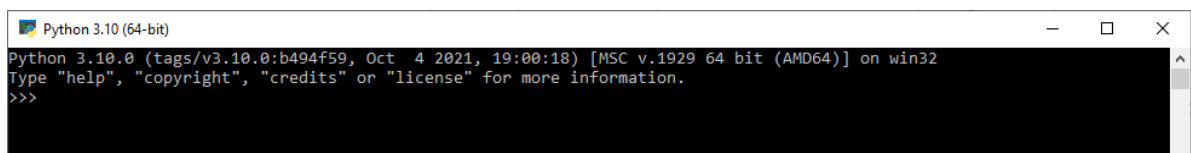


Figura 3.6: Ejecución herramienta virtual Python.

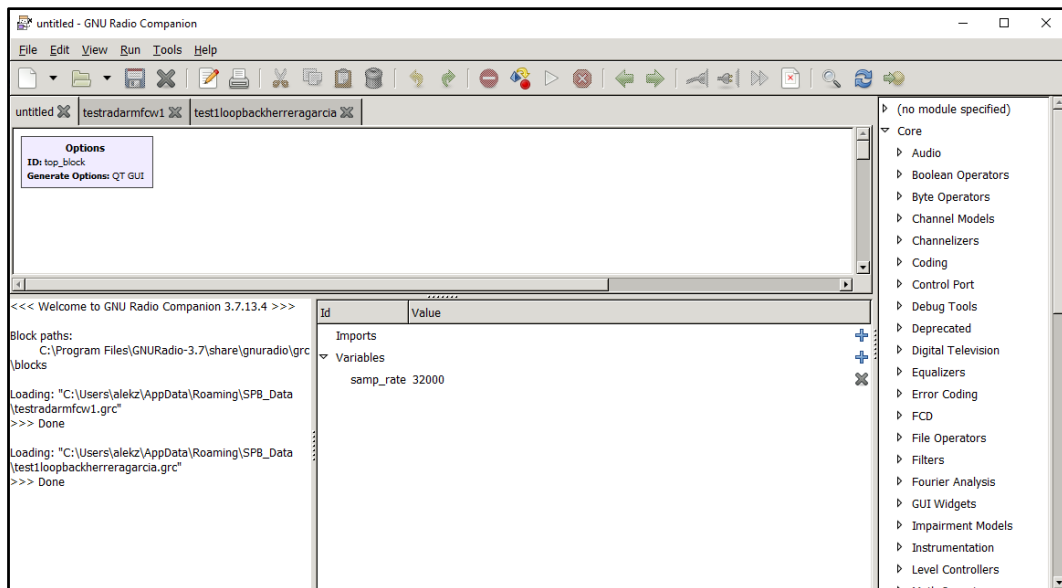


Figura 3.7: Interfaz de inicio herramienta virtual GNU Radio.

Segundo, se procede a conectar los 2 dispositivos Pluto al computador por medio del cable micro USB tipo B a USB tipo A, una vez realizada la conexión se encenderán los LEDs de alimentación y de comunicación (ver **Figura 3.8**). Luego, se instalan los controladores "PlutoSDR-M2k-USB-Drivers" y "Libiio" en las versiones solicitadas para asegurar la correcta comunicación entre los SDR y el PC (ver **Figuras 3.9** y **3.10**).



Figura 3.8: Conexión USB del SDR al PC.

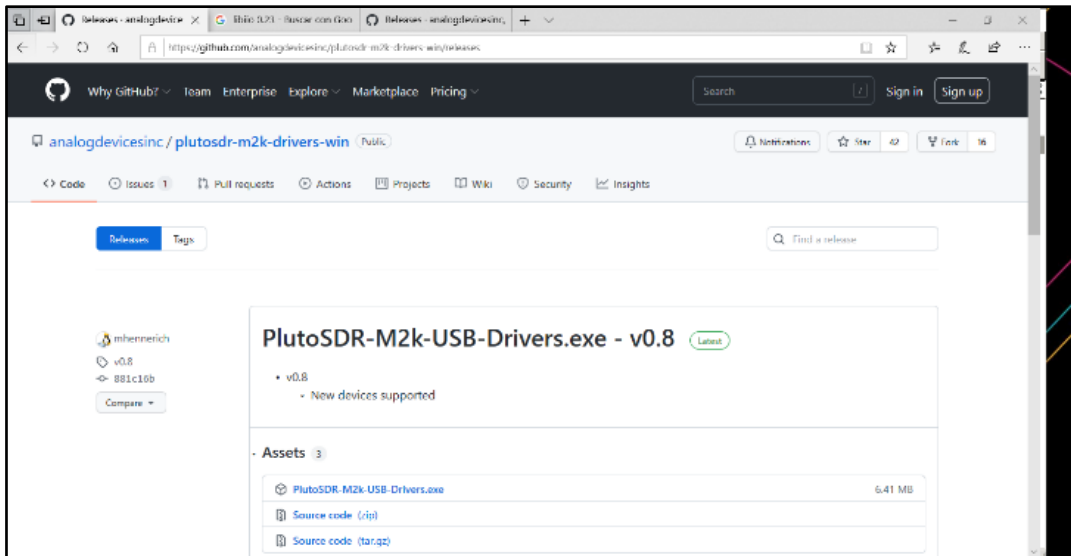


Figura 3.9: Repositorio de archivo ejecutable "PlutoSDR-M2k-USB-Drivers - v0.8".

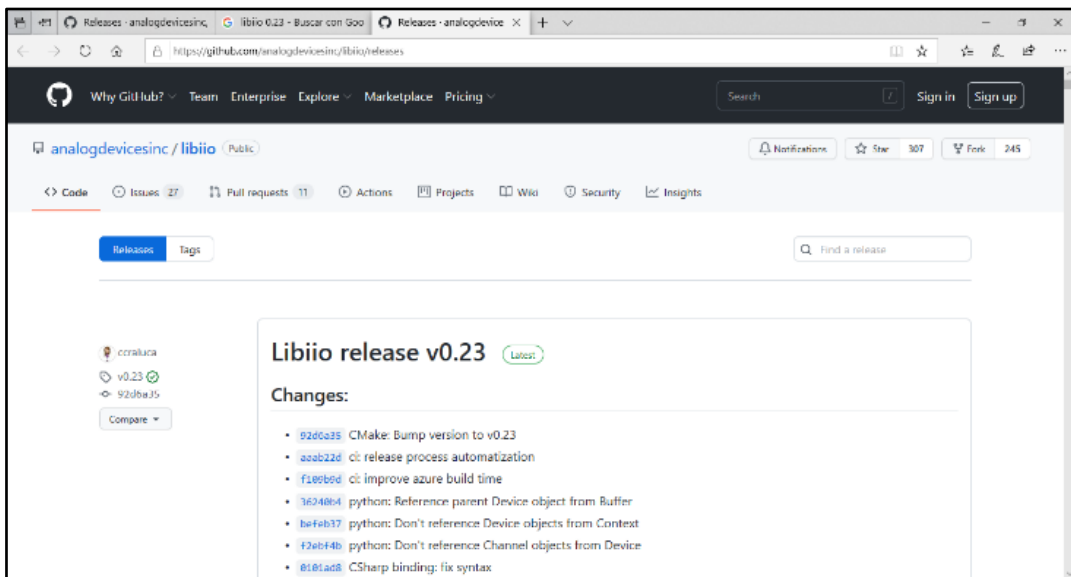


Figura 3.10: Repositorio de archivo ejecutable "Libiio v0.23".

Tercero, abriendo el símbolo del sistema en modo administrador se ejecuta el comando "iio_info -s" tal y como es posible apreciar en la **Figura 3.11**. Este comando permite en primer lugar confirmar que existe comunicación entre los SDR y el computador y a su vez otorga la identificación URI de cada SDR. Este parámetro es de suma importancia en los siguientes pasos.


```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\Laboratorio>iio_info -s
Library version: 0.23 (git tag: c14a0f8)
Compiled with backends: xml ip usb serial
Unable to create Local IIO context : Function not implemented (40)
Available contexts:
 0: 0456:b673 (Analog Devices Inc. PlutoSDR (ADALM-PLUTO)), serial=104473dc599300171f002c00d1172a2edf [usb:1.5.5]
```

Figura 3.11: Comando "iio_info -s" en el CMD.

También es posible obtener la URI por medio del comando " iio_attr -a -d " cómo se observa en la **Figura 3.12**.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\Laboratorio>iio_attr -a -d
Using auto-detected IIO context at URI "usb:1.5.5"
WARNING: Skipping broken USB device. Please upgrade libusb.
IIO context has 5 devices:
iio:device3, cf-ad9361-dds-core-lpc: found 0 device attributes
iio:device1, ad9361-phy: found 18 device attributes
iio:device4, cf-ad9361-lpc: found 0 device attributes
iio:device2, xadc: found 1 device attributes
iio:device0, adm1177: found 0 device attributes
```

Figura 3.12: Comando "iio_attr -a -d" en el CMD.

Cuarto, se procede a armar el circuito, tal y como se aprecia en la **Figura 3.13**, generando así el sistema de radar MFCW. Verificar que para cada SDR le corresponde una antena tipo horn en la conexión TX y una antena tipo "whip" de 4 cm (la que viene por defecto en el kit del dispositivo) para RX.



Figura 3.13: Armado del prototipo del sistema de radar.

3.3.3. Diagrama de Bloques en GNU Radio

Cuarto, una vez abierto GNU Radio, se realiza el diagrama de bloques del sistema mostrado en la **Figura 3.14**.

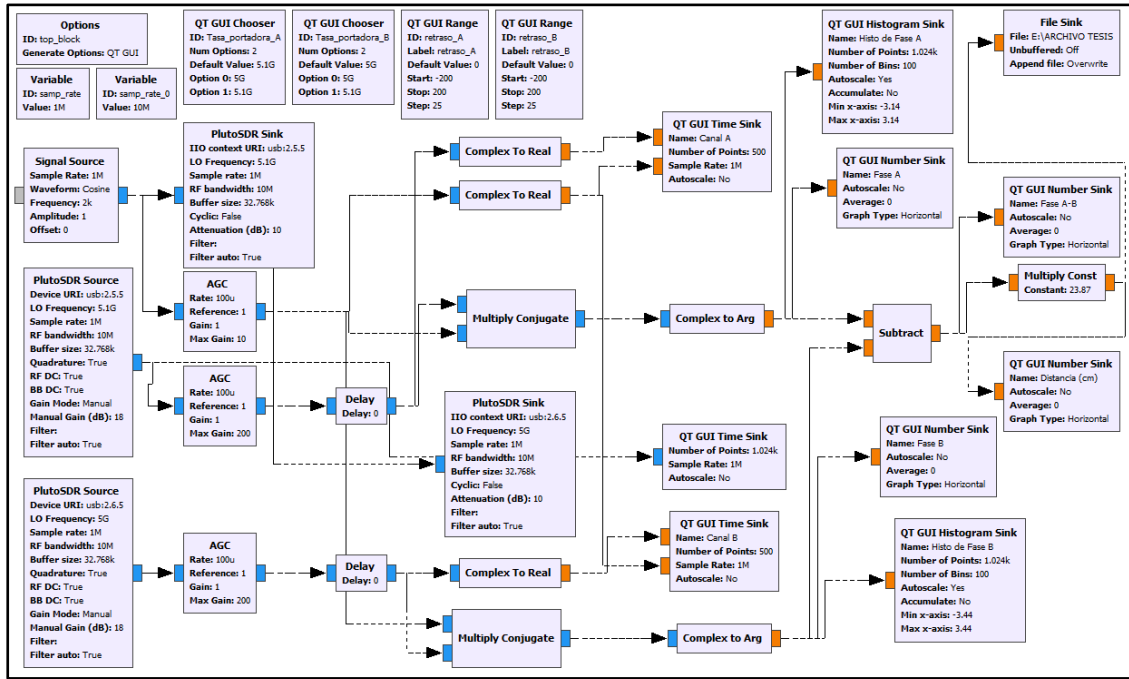


Figura 3.14: Diagrama de bloques sistema de radar en GNU Radio.

Una vez concluido todo el diagrama de bloques, se procede a verificar su correcta implementación. Para ello simplemente hay que cerciorarse de que los botones "generate the Flow graph" y "execute the Flow graph" estén habilitados para su utilización (ver **Figura 3.15**).

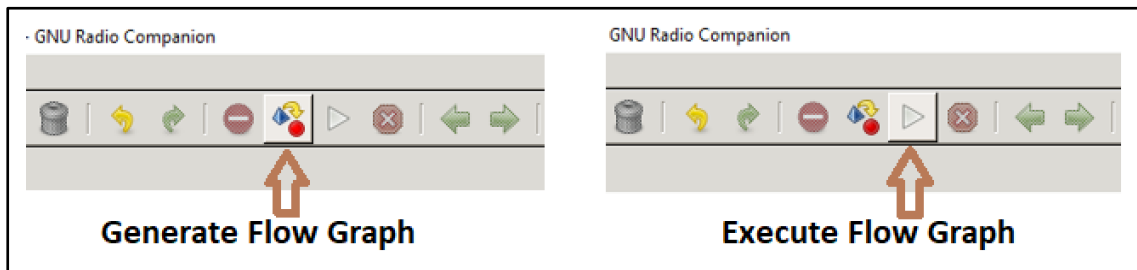


Figura 3.15: Botones de simulación GNU Radio.

En caso de que estos botones no estén disponibles, verificar todas las conexiones y también el cuadro de dialogo ubicado en la esquina inferior izquierda, en caso de existir algún error, se mostrará el detalle de este en esta zona (ver **Figura 3.16**).

```
<<< Welcome to GNU Radio Companion 3.7.13.4 >>>

Block paths:
  C:\Program Files\GNURadio-3.7\share\gnuradio\grc\blocks

Loading: "C:\Users\alekz\AppData\Roaming\SPB_Data\testradarmfcw.grc"
>>> Done

Loading: "C:\Users\alekz\AppData\Roaming\SPB_Data\test1loopbackherreragarcia.grc"
>>> Done
```

Figura 3.16: Cuadro de dialogo GNU Radio.

Al dar clic en el botón de ejecución, se mostrará por pantalla un cuadro gráfico con los resultados esperados, tal y como se observa a continuación (ver **Figura 3.17**):

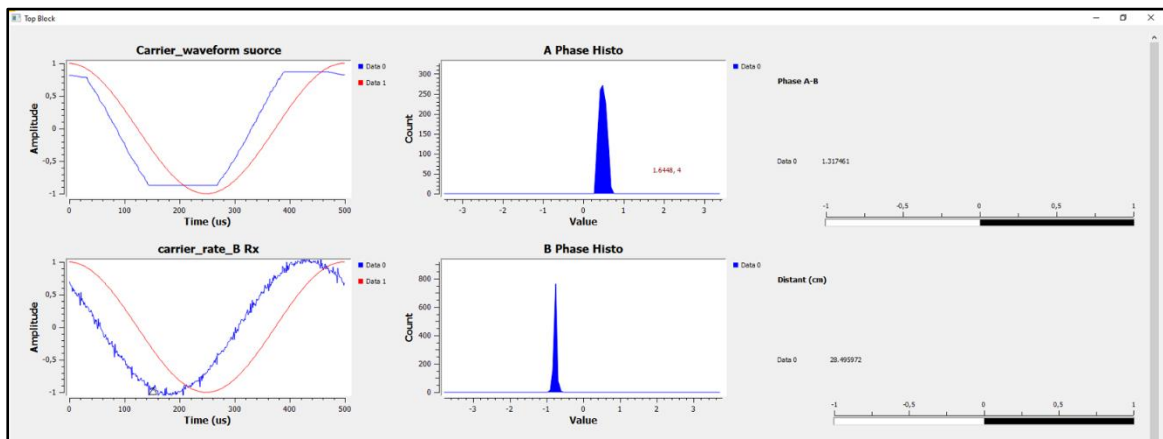


Figura 3.17: Cuadro de dialogo GNU Radio.

Al momento de iniciar la simulación se generará un archivo de datos binarios que, para este caso, llevará el nombre de "ARCHIVO TESIS". Tener en consideración de que éste archivo debe encontrarse en el mismo directorio que el algoritmo de Matlab "Codigo_Final.m" (ver

Figura 3.18), mismo que se encargará de realizar los cálculos estadísticos, así como la subida de los datos de distancia a ThingSpeak.

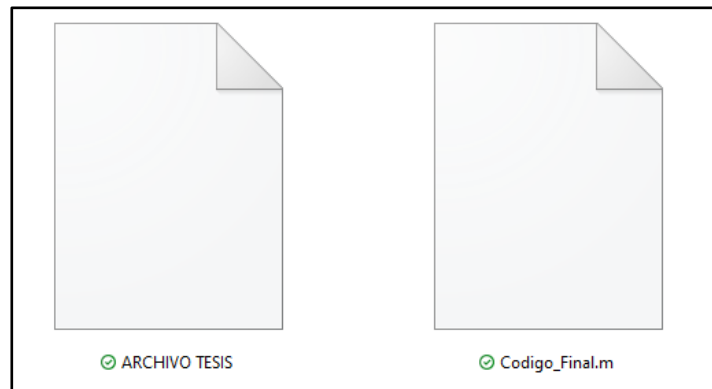


Figura 3.18: Archivo de Matlab y archivo de datos binarios en el mismo directorio.

3.3.4. Algoritmo de Matlab

Como se aprecia en la **Figura 3.19**, para poder tratar los datos almacenados en “ARCHIVO TESIS” se emplea la función “fopen” a la cual se le ha asignado la variable “f” como nombre. A continuación, a esta variable se le aplica la función “fread”, que devuelve un vector columna denominado “values” con todas las distancias medidas durante la simulación. Posteriormente, se toma una muestra de 50 datos para calcular la media, mediana, varianza y desviación estándar (ver **Figura 3.20**). No olvidar indicar el tipo de dato “float” en el argumento de “fread”.

```
%% Algoritmo para procesar datos del archivo binario de GNURadio Companion
% PROYECTO DE TITULACION
% Autores: Alexander Adrián Herrera Echerry    Pablo David García Tobar
clc
close all
clear all

%% PROCESAR LOS DATOS SUBIDOS A LA NUBE

f = fopen('ARCHIVO TESIS', 'rb');
values = fread(f, Inf, 'float');
values = values(1:50,1);
dimen = size(values,1);
```

Figura 3.19: Bloque de código Matlab.

```
%% CALCULO DE LA MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL DE LOS DATOS OBTENIDOS

x = mean (values);%Cálculo de la Media
Me = median(values); %Cálculo de la Mediana
S = std(values);%Cálculo de la Desviación Estándar
S2 = S*S;%Cálculo de la Varianza

%% MOSTRAR DATOS ESTADÍSTICOS POR PANTALLA
fprintf("El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de %f cm. \n",x);
fprintf("La mediana de distancia obtenida por el radar es de %f cm. \n",Me);
fprintf("Desviación Estándar: %f \n",S);
fprintf ("Varianza: %f \n",S2);
```

Figura 3.20: Bloque de código Matlab.

La ejecución de esta sección de código devolverá como resultado las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 3.21**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 26.246098 cm.
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 23.159099 cm.
Desviación Estándar: 8.793567
Varianza: 77.326828
```

Figura 3.21: Resultado de código Matlab.

3.3.5. Subida De Datos A ThingSpeak

En primer lugar, es necesario disponer de un canal activo dentro de la plataforma ThingSpeak. Para ello, se abre en el navegador del computador la URL www.thingspeak.com, se debe mostrar por pantalla una página similar a la de la **Figura 3.22**.

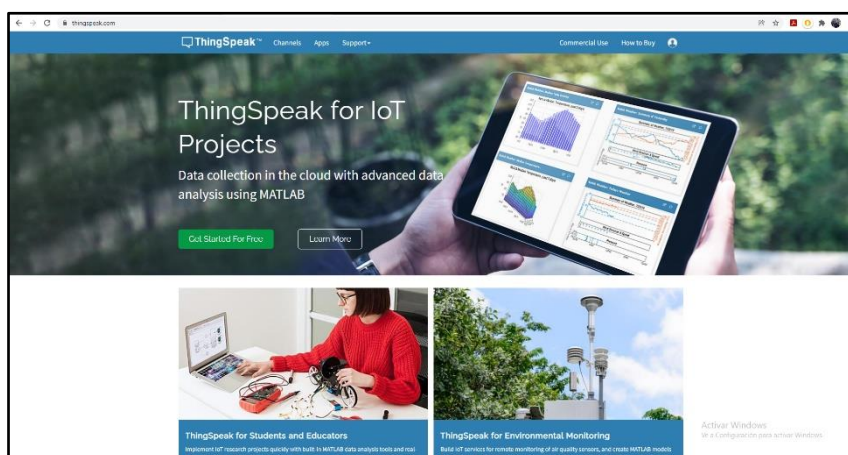


Figura 3.22: Página web de ThingSpeak.

Dentro de la página se crea una cuenta de usuario para tener acceso a los servicios de la plataforma. Una vez obtenida la cuenta, dirigiéndose a la pestaña "Channels" se podrá crear un nuevo canal dándole clic al botón "New Channel" (ver **Figura 3.23**).

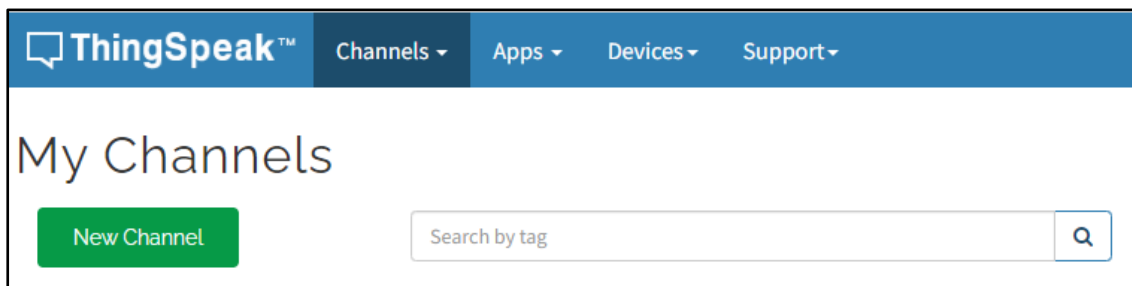


Figura 3.23: Creación de un nuevo canal en ThingSpeak.

Posteriormente aparecerá la ventana de creación de canal. Aquí se procede a llenar los campos de nombre, Descripción y Field (éste último en función de cuántos parámetros se deseen monitorear) tal y como se aprecia en la **Figura 3.24**. Para esta práctica solo se empleará un campo dentro del canal. Finalmente se da clic en el botón "Save Channel" ubicado al final de la venta de creación de canal y con ello ya se tendrá generado el correspondiente canal.

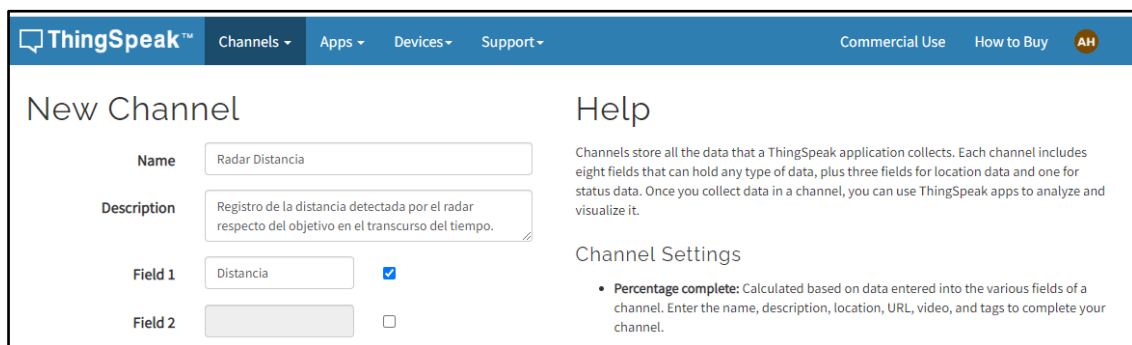


Figura 3.24: Parámetros de creación de un nuevo canal en ThingSpeak.

Una vez guardado el canal se podrá visualizar su actividad ingresando al mismo. Aquí será posible visualizar la data proveniente de la simulación de GNU Radio amenera de gráfico distancia en función del tiempo (ver **Figura 3.25**). Pero para ello, aun hace falta crear un puente de comunicación entre ambas plataformas. Por el momento, se debe tener en cuenta los parámetros de "Channel ID" y el "API Key" (ver **Figura 3.26**).

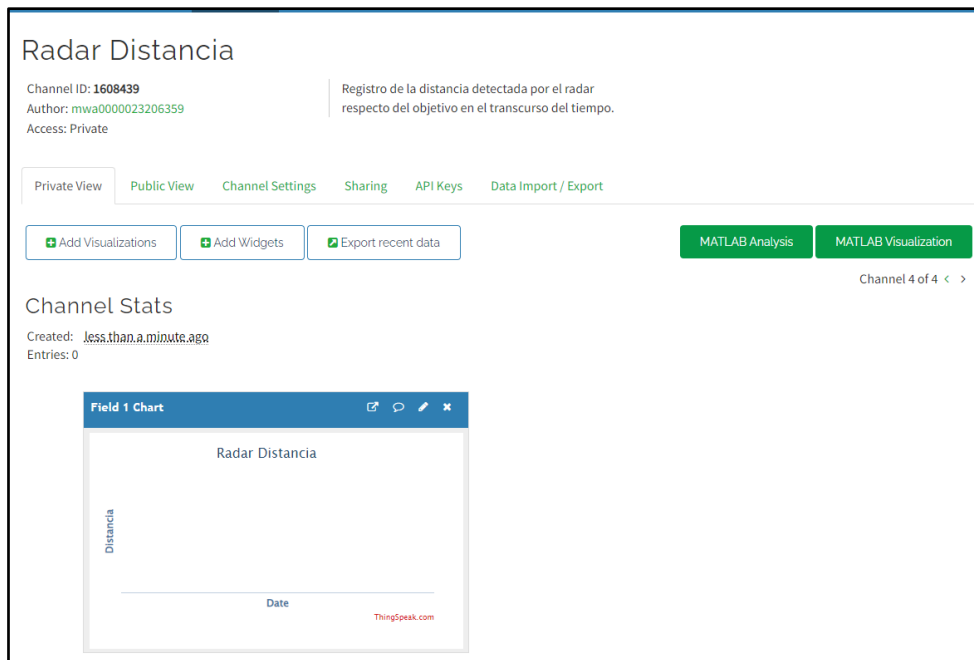


Figura 3.25: Interfaz de canal en ThingSpeak.

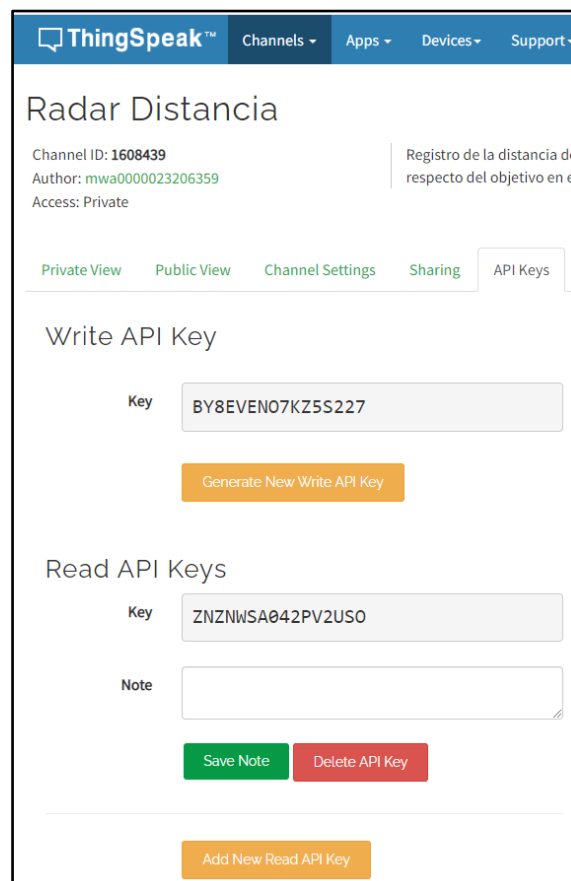


Figura 3.26: Parámetro "API Key" en canal de ThingSpeak.

Como punto final de la práctica se procede a instalar el widget oficial de ThingSpeak en el dispositivo móvil Android. Para ello, primero se debe buscar y descargar la aplicación "IoT ThingSpeak Monitor Widget" desde la tienda de aplicaciones (ver **Figura 3.27**). Esta aplicación será la encargada de establecer comunicación entre la plataforma en la nube y el dispositivo móvil para poder así tener acceso a los datos generados desde GNU Radio en tiempo real.



Figura 3.27: Aplicación oficial "IoT ThingSpeak Monitor Widget".

Para hacer uso de esta aplicación, pulsando sobre la pantalla del terminal móvil aparecerá una sección para personalización del dispositivo móvil Android con la opción de widgets tal y como se aprecia en la **Figura 3.28**.



Figura 3.28: Menú de personalización del dispositivo móvil.

Presionando la opción "Widgets" aparecerá el respectivo menú con todos los que se encuentren instalados hasta ese momento. Simplemente hay que buscar el widget "IoT ThingSpeak Monitor Widget" y seleccionarlo. Una vez elegido se colocará en pantalla del terminal móvil (ver **Figura 3.29**).



Figura 3.29: Widget en pantalla del terminal móvil.

Luego, al seleccionar el widget es posible ingresar a sus opciones principales, aquí se deberán ingresar los campos de Channel ID y el API Key de lectura previamente guardados del canal generado en la plataforma ThingSpeak desde el ordenador (ver **Figura 3.30**). También es posible configurar otros parámetros de visualización, así como la activación de alarmas por medio de notificaciones tipo "push" en el dispositivo móvil que permitan estar al tanto de cualquier cambio o comportamiento anormal dentro del proyecto que se esté revisando.

También es posible configurar la tasa de refresco de la data recibida y la nomenclatura de los parámetros de análisis.



Figura 3.30: Ventana de configuración de la aplicación "IoT ThingSpeak Monitor Widget".

Finalmente, el valor de distancia entre el radar y el objetivo a medir aparecerá en la sección de widgets de pantalla del terminal móvil. Cualquier cambio de posición del objetivo se verá reflejado aquí (ver **Figura 3.31**).



Figura 3.31: Widget "IoT ThingSpeak Monitor Widget" en la pantalla de inicio.

Dentro del mismo algoritmo de Matlab empleado para el cálculo de las medidas de tendencia central se encuentra una sección de código dedica a subir los datos de distancia directamente a la plataforma en la nube de ThingSpeak (ver **Figura 3.32**)

```
%% TRANSMISION DE LOS DATOS A THINGSPEAK

tStamps = datetime('now')-minutes(dimen-1):minutes(1):datetime('now');
tStamps = rot90(tStamps,3);
channelID = 1608439;
writeKey = "BY8EVENO7K25S227";
thingSpeakWrite(channelID, values(:,1),'TimeStamp', tStamps, 'WriteKey', writeKey);
```

Figura 3.32: Bloque de código Matlab.

Para ello, por medio del tamaño del vector “values” y de la función “datetime”, es posible generar una marca de tiempo individual para cada dato que se procesa. Debido a que la variable “tStamps” es un vector fila, por medio de la función “rot90” es posible convertirlo en un vector columna rotándolo 270 grados aplicando como segundo argumento de la función un factor de 3. Previamente se habían obtenido la ID del canal y su respectiva API de escritura. Con todos estos parámetros es posible ejecutar el código y finalmente enviar la data a ThingSpeak.

De esta forma, inmediatamente la plataforma mostrará por pantalla los datos que va recibiendo en función del tiempo, y generando una gráfica como la que se observa en la **Figura 3.33**.

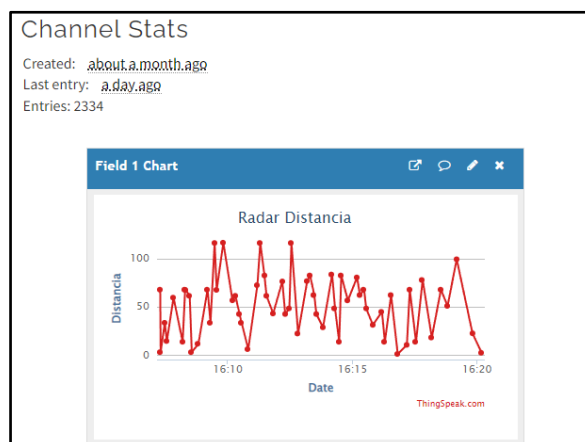


Figura 3.33: Datos de distancia subidos a la nube.

Como último paso, simplemente resta por verificar que la información también pueda ser visualizada desde un dispositivo móvil por medio del widget "IoT ThingSpeak Monitor Widget", como se aprecia en la **Figura 3.34**.

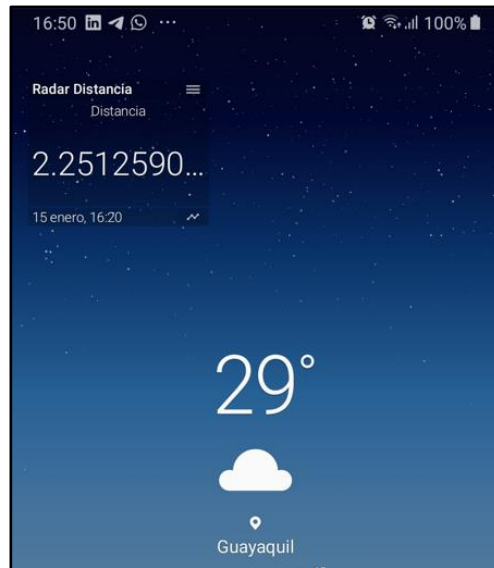


Figura 3.34: Dato de distancia visualizados desde el dispositivo móvil.

CAPÍTULO 4

4. Resultados

En esta sección se pretende analizar de manera estadística el nivel de precisión del prototipo del sistema de radar que se ha construido para el presente proyecto de titulación, teniendo en cuenta de que esta investigación se ha limitado al uso exclusivo de los recursos disponibles en el laboratorio de Radiocomunicaciones, como el caso de los dispositivos SDR, las antenas, los cables y adaptadores.

Primero, en la **Figura 4.1** es posible apreciar al prototipo de solución propuesta con sus respectivos equipos y conexiones. También es posible apreciar la referencia de medida que marca la distancia entre el prototipo de sistema de radar y el objetivo.



Figura 4.1: Prototipo del sistema de radar en operación.

Entre los aspectos básicos para tener en cuenta está la longitud de onda que transmiten las antenas tipo bocina. Este dato puede obtenerse mediante la expresión **1**. Otro factor importante es la zona Fresnel de las antenas de transmisión, misma que se calcula a través de

2, conociendo los parámetros de diámetro de la boca de la antena tipo bocina y la longitud de onda previamente calculada.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde:

- "c" corresponde a la velocidad de la luz.

- "f" corresponde a la frecuencia de operación.

Entonces:

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{5 * 10^9} = 60 \text{ cm (Para la antena Tx del canal "A")}$$

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{5.1 * 10^9} = 58 \text{ cm (Para la antena Tx del canal "B")}$$

Por lo tanto, la zona de Fresnel para el canal "A" es:

$$R < \frac{2 * D^2}{\lambda} \quad (2)$$

$$R < \frac{2 * (0.12)^2}{0.060}$$

$$\mathbf{R < 48 \text{ cm}}$$

De la misma forma, la zona de Fresnel para el canal "B" es:

$$R < \frac{2 * D^2}{\lambda}$$

$$R < \frac{2 * (0.12)^2}{0.058}$$

$$\mathbf{R < 49 \text{ cm}}$$

Por consiguiente, para expresar mediciones correctas, es necesario tomar la referencia o cero una vez superada la zona de Fresnel anteriormente calculada.

Otro aspecto para considerar es la verificación del cumplimiento de la frecuencia de Nyquist. Dentro de las simulaciones realizadas por este prototipo se considera la frecuencia de la señal mensaje (200 kHz) como frecuencia de interés. Se escogió como tasa de muestreo de 1Mega, por lo que se cumple con la condición de que esta última frecuencia sea de al menos el doble de la frecuencia de interés.

4.1. Análisis de Resultados

Segundo, una vez colocado el sistema de radar, la referencia de medición posterior a la zona de Fresnel, se realiza la toma de datos del factor distancia colocando el objetivo en diferentes posiciones y ejecutado el diagrama de bloques que simula el sistema de radar por medio de GNU Radio. En esta ocasión, se realizarán mediciones en posiciones distintas, partiendo del origen hasta una distancia máxima de 1 m, en intervalos de 10 cm.

Para $R = 10$ cm (ver **Figura 4.2**):



Figura 4.2: Objetivo colocado a una distancia $R = 10$ cm.

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 3**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 11.227036 cm.
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 10.204391 cm.
Desviación Estándar: 9.493632
Varianza: 90.129053
```

Figura 4.3: Resultado obtenido del código Matlab.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor aproximado} - \text{Valor exacto}|}{\text{Valor exacto}} * 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.1122 - 0.10|}{0.10} * 100 = 12.3 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.3**, se obtuvo una distancia promedio de R = 11.23 cm, que no dista por mucho del valor referencial, ya que difiere por solo 1.23 cm respecto de R = 10 cm, lo que se traduce en un error aproximado del 12.3 %.

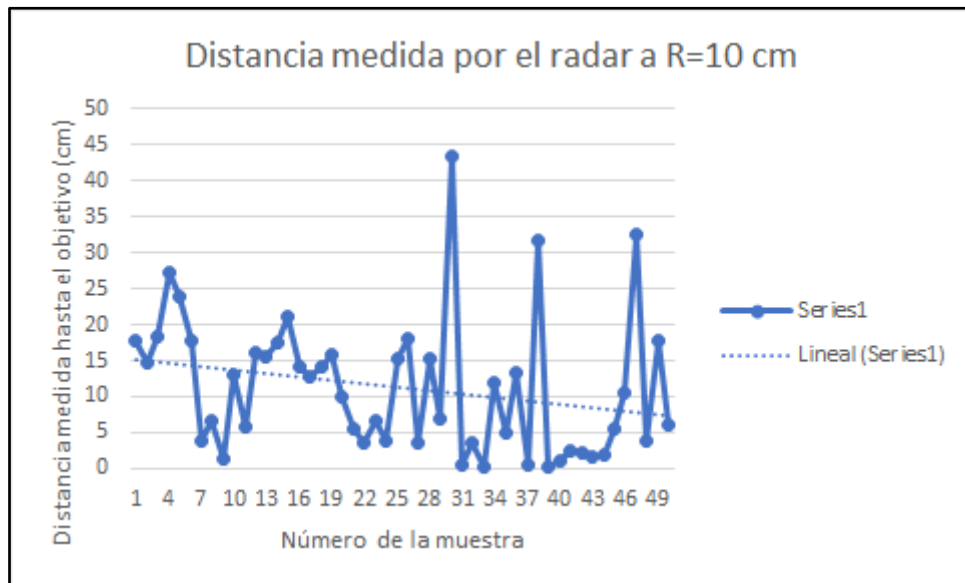


Figura 4.4: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a R = 10 cm.

Para el primer caso de medición, como se puede apreciar en la **Figura 4.4**, existe cierta tendencia de los datos obtenidos a oscilar en valores cercanos a la referencia de $R = 10\text{ cm}$, visualmente se aprecia que la mayoría de valores se encuentran en la zona de $\pm 10\text{ cm}$ salvo ciertos valores aberrantes (como el caso de la muestra número 30 del gráfico), mismos que pueden ser resultado de las condiciones climatológicas del medio en el cual se realizaban las pruebas, ya que en ese momento se contaba con la presencia de mucho viento, lo cual por momentos desestabilizaba el trípode que sujetaba la superficie reflectante usada como objetivo.

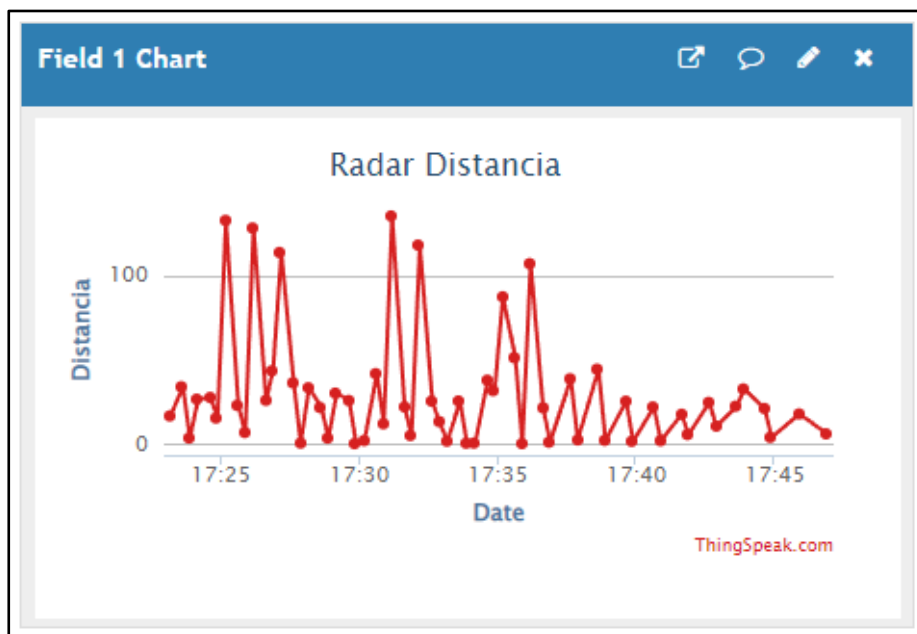


Figura 4.5: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a $R = 10\text{ cm}$.

En otra instancia del mismo experimento, ahora visto desde la gráfica generada en ThingSpeak (ver **Figura 4.5**), es posible divisar un comportamiento similar, con la mayoría de los datos oscilando en torno al valor de referencia, que en este caso es la distancia $R = 10\text{ cm}$.

Pese a la dispersión existente entre los datos, se considera aceptable la distancia promedio obtenida en esta primera prueba (11 cm), ya que no se encuentra muy alejada de la referencia que es de 10 cm.

Para $R = 20$ cm (ver **Figura 4.6**):



Figura 4.6: Objetivo colocado a una distancia $R = 20$ cm.

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.7**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 26.246098 cm.  
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 23.159099 cm.  
Desviación Estándar: 8.793567  
Varianza: 77.326828
```

Figura 4.7: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.2624 - 0.20|}{0.20} * 100 = 31.2 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.7**, se obtuvo una distancia promedio de R = 26.24 cm, que no dista por mucho del valor referencial, ya que difiere por solo 6.24 cm respecto de R = 20 cm, lo que se traduce en un error aproximado del 31.2 %.

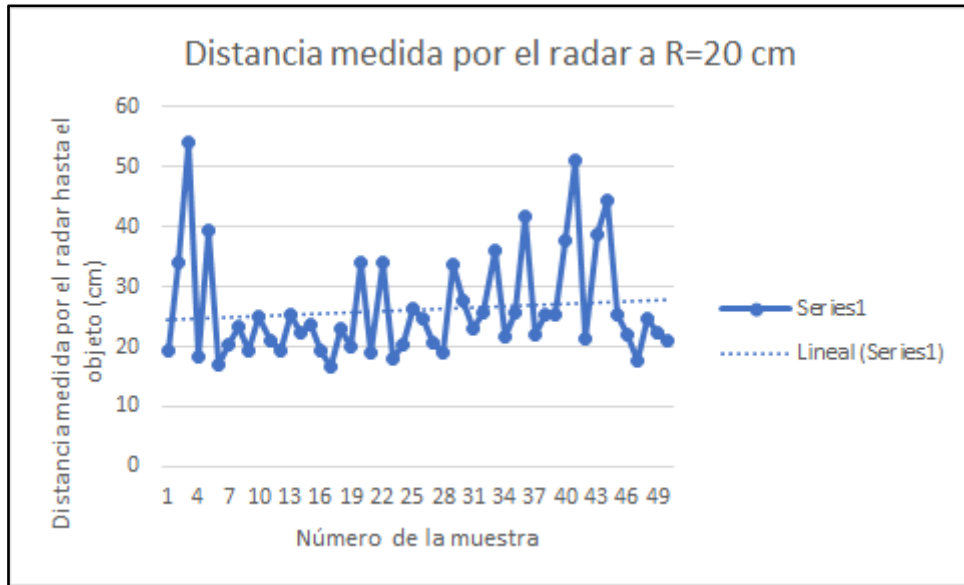


Figura 4.8: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a R = 20 cm.

Para esta segunda instancia del experimento (ver **Figura 4.8**), se aprecia un comportamiento parecido hasta cierto punto al primer escenario. De la misma forma, la mayor parte de los datos de la muestra oscilan alrededor del valor de referencia R = 20 cm, a exceptuando ciertos datos considerados atípicos.

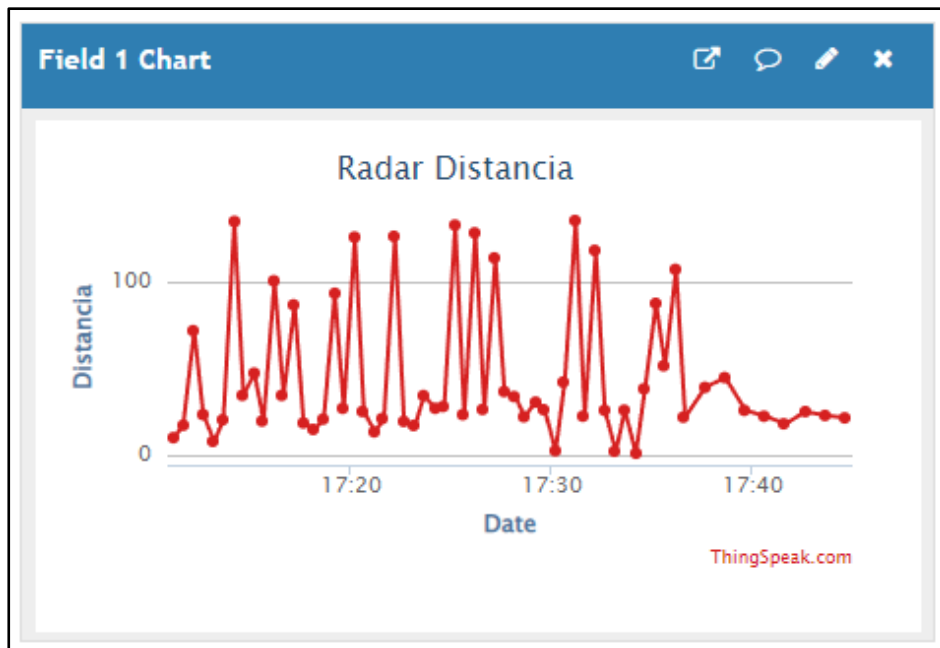


Figura 4.9: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a $R = 20$ cm.

La gráfica de ThingSpeak (ver Figura 4.9) afirma lo obtenido mediante el código de Matlab, la mayoría de los datos oscilando cerca del valor referencial con ciertos datos atípicos.

Para $R = 30$ cm (ver **Figura 4.10**):



Figura 4.10: Objetivo colocado a una distancia $R = 30$ cm.

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.11**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 27.029337 cm.
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 25.113166 cm.
Desviación Estándar: 5.873268
Varianza: 34.495279
```

Figura 4.11: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.2702 - 0.30|}{0.30} * 100 = 9.93 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.12**, se obtuvo una distancia promedio de R = 27.02 cm, que no dista por mucho del valor referencial, ya que difiere por solo 2.88 cm respecto de R = 30 cm, lo que se traduce en un error aproximado del 9.93 %.

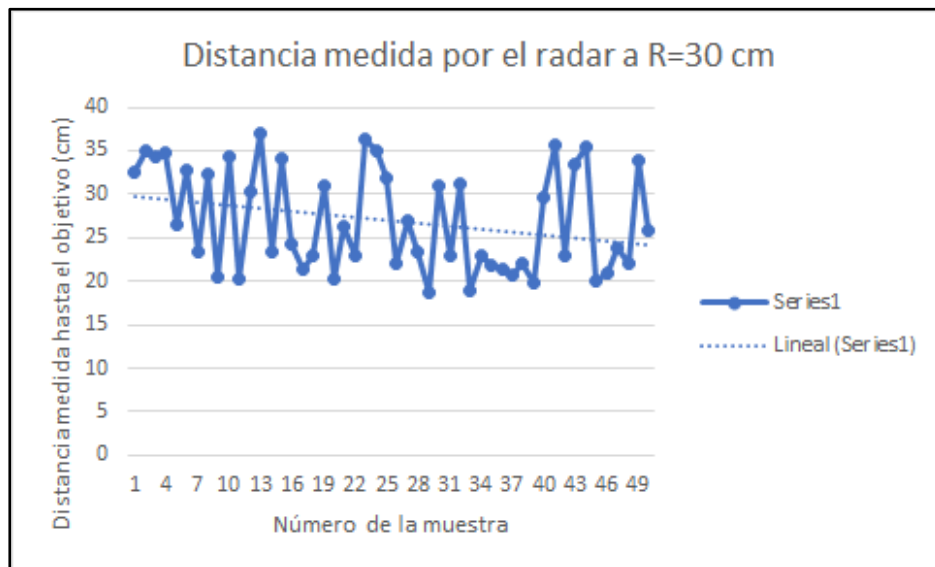


Figura 4.12: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a R = 30 cm.

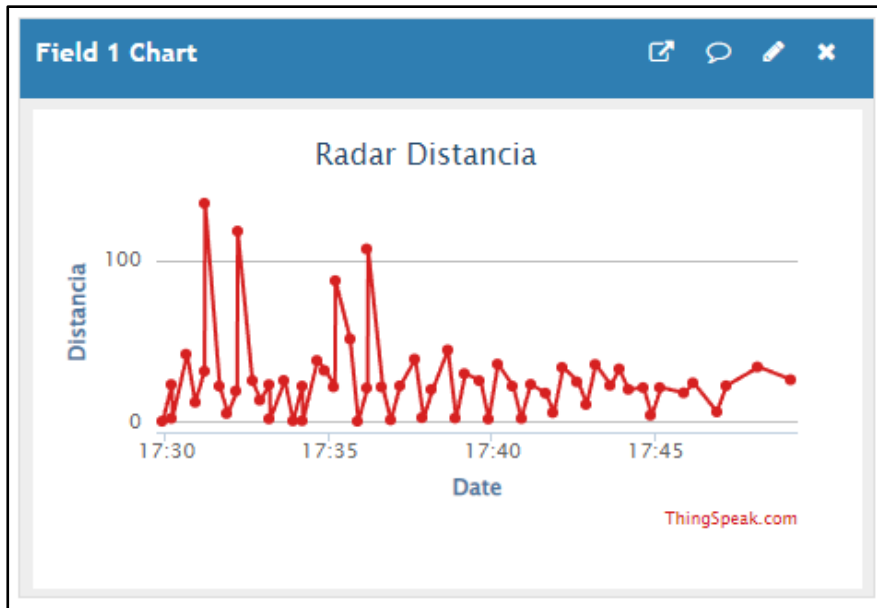


Figura 4.13: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a R = 30 cm.

El comportamiento que se visualiza en ThingSpeak (ver **Figura 4.13**) revela la tendencia de los datos a rondar el valor de distancia de referencia, que en este caso es R = 30 cm que, al igual que en los escenarios anteriores, presenta cierta cantidad de valores atípicos.

Para R = 40 cm:

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.14**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 53.424473 cm.
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 43.090351 cm.
Desviación Estándar: 35.306007
Varianza: 1246.514103
```

Figura 4.14: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.5309 - 0.40|}{0.40} * 100 = 33.55 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.15**, se obtuvo una distancia promedio de $R = 53.09$ cm. A partir de este cuarto análisis ya se aprecia un mayor distanciamiento respecto del dato de referencia, existiendo un margen de 13.09 cm respecto de $R = 40$ cm, lo que se traduce en un error aproximado del 33.55% .

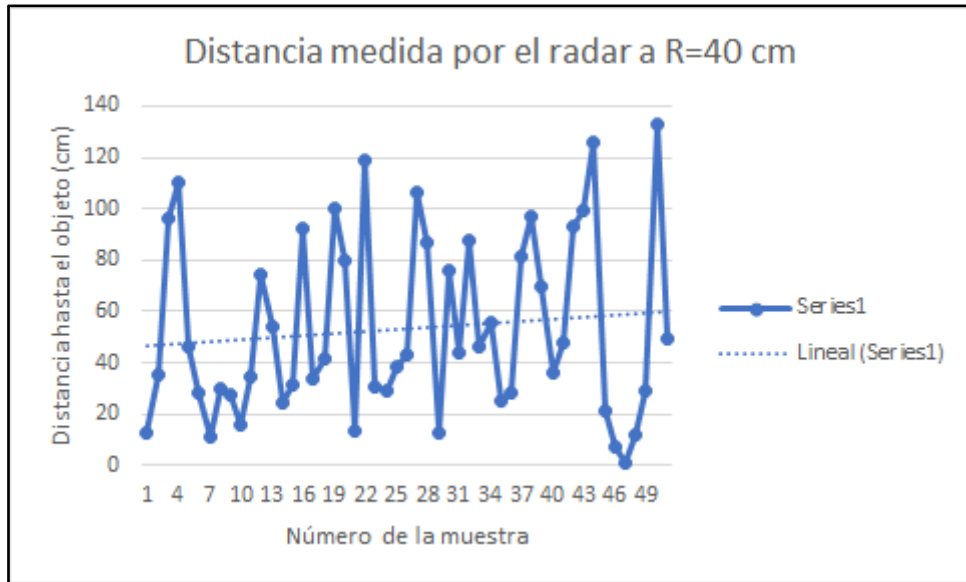


Figura 4.15: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a $R = 40$ cm.

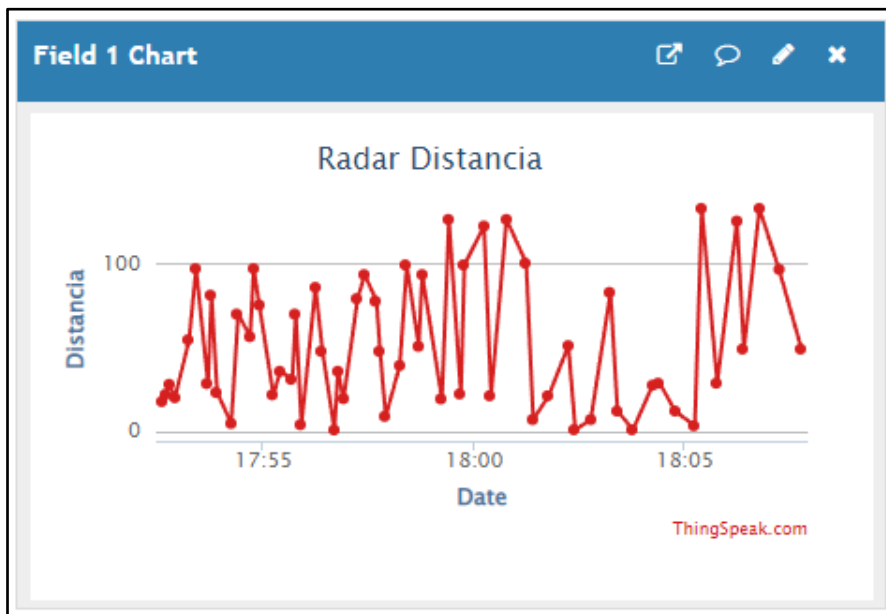


Figura 4.16: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a $R = 40$ cm.

El comportamiento que se visualiza en ThingSpeak (ver **Figura 4.16**) revela la tendencia de los datos a rondar el valor de distancia de referencia, que en este caso es $R = 40$ cm que, al igual que en los escenarios anteriores, presenta cierta cantidad de valores atípicos.

Para $R = 50$ cm:

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.17**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 53.424473 cm.  
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 43.090351 cm.  
Desviación Estándar: 35.306007  
Varianza: 1246.514103
```

Figura 4.17: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.5342 - 0.40|}{0.40} * 100 = 6.84 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.18**, se obtuvo una distancia promedio de $R = 53.42$ cm. Aquí el experimento expone un margen de 3.42 cm respecto de la referencia $R = 50$ cm, lo que se traduce en un error aproximado del 6.84 %.

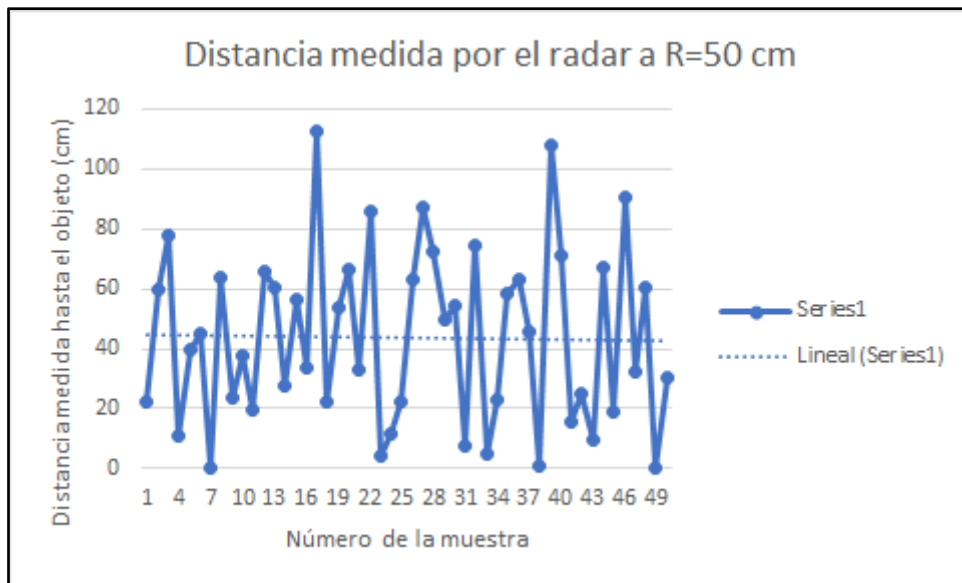


Figura 4.18: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a R = 50 cm.

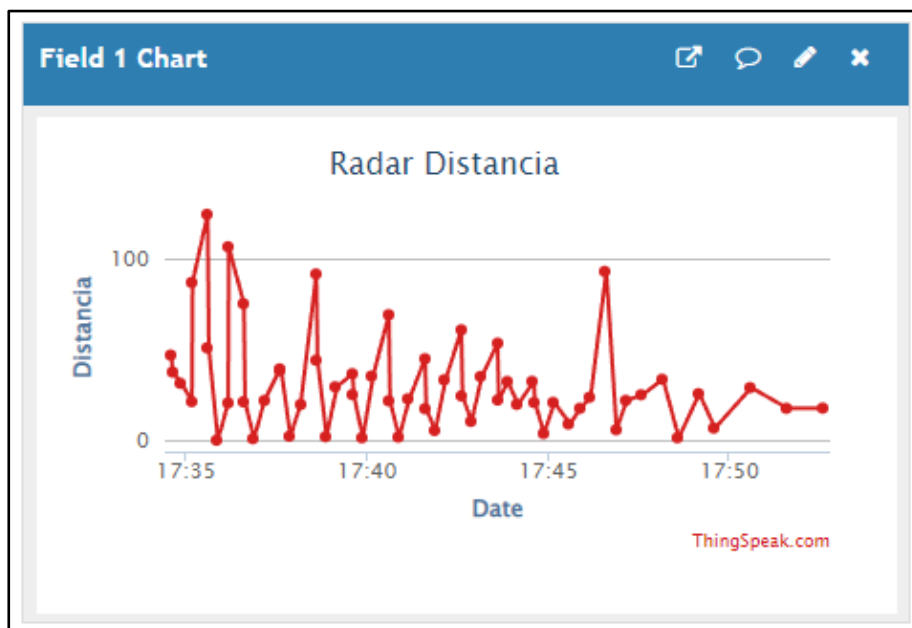


Figura 4.19: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a R = 50 cm.

El comportamiento que se visualiza en ThingSpeak (ver **Figura 4.19**) revela la tendencia de los datos a rondar el valor de distancia de referencia, que en este caso es R = 50 cm que, al igual que en los escenarios anteriores, presenta cierta cantidad de valores atípicos.

Para R = 60 cm:

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.20**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 67.458011 cm.  
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 70.762779 cm.  
Desviación Estándar: 44.165599  
Varianza: 1950.600157
```

Figura 4.20: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.6745 - 0.60|}{0.60} * 100 = 12.41 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.21**, se obtuvo una distancia promedio de R = 67.45 cm. Aquí el experimento expone un margen de 7.45 cm respecto de la referencia R = 60 cm, lo que se traduce en un error aproximado del 12.41 %.

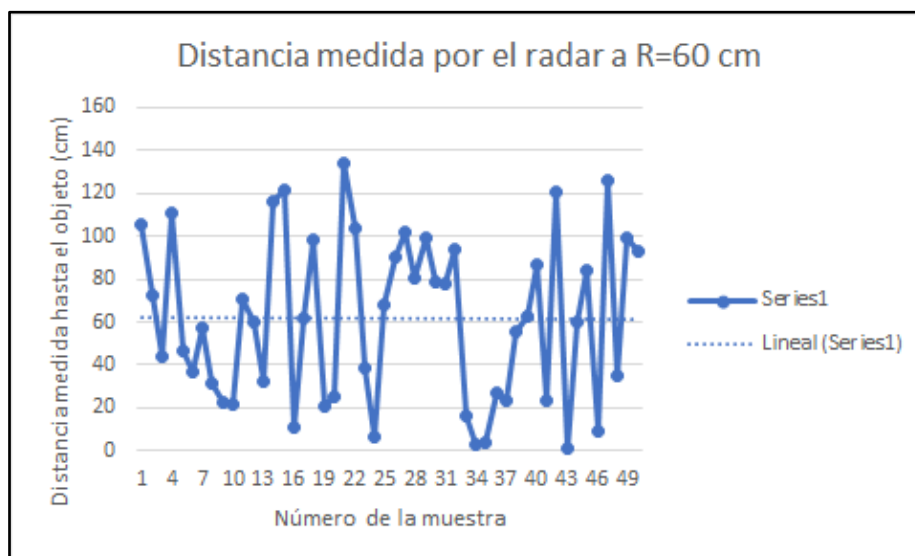


Figura 4.21: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a R=60 cm.

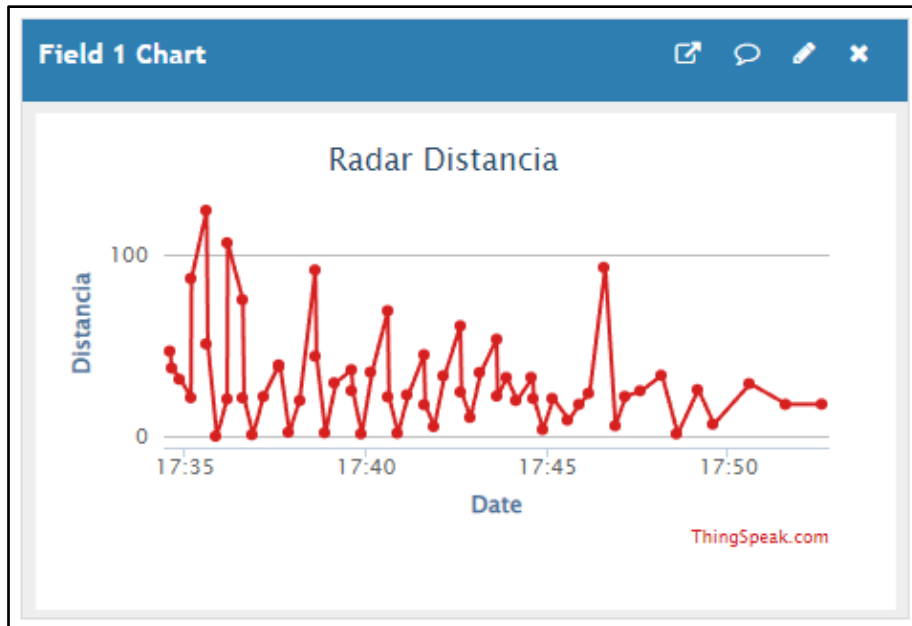


Figura 4.22: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a R = 60 cm.

El comportamiento que se visualiza en ThingSpeak (ver **Figura 4.22**) revela la tendencia de los datos a rondar el valor de distancia de referencia, que en este caso es R = 60 cm que, al igual que en los escenarios anteriores, presenta cierta cantidad de valores atípicos.

Para R = 70 cm:

Se ejecuta el algoritmo de Matlab para hacer lectura del archivo generado por GNU Radio. En este proceso se realiza la toma de una muestra de 50 datos, mismos que son procesados para determinar las medidas de tendencia central que se observan en la **Figura 4.23**.

```
El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de 91.010535 cm.
La mediana de distancia obtenida por el radar es de 90.978348 cm.
Desviación Estándar: 37.079368
Varianza: 0.416134
```

Figura 4.23: Valores de distancia obtenidos durante la toma de datos.

Aplicando **3** se obtiene el porcentaje de error existente en la muestra que se está analizando:

$$\% \text{ Error} = \frac{|0.9101 - 0.70|}{0.70} * 100 = 30.01 \%$$

Como se aprecia en la **Figura 4.24**, se obtuvo una distancia promedio de $R = 91.01$ cm. Aquí el experimento expone un margen de 21.01 cm respecto de la referencia $R = 60$ cm, lo que se traduce en un error aproximado del 30.01% .

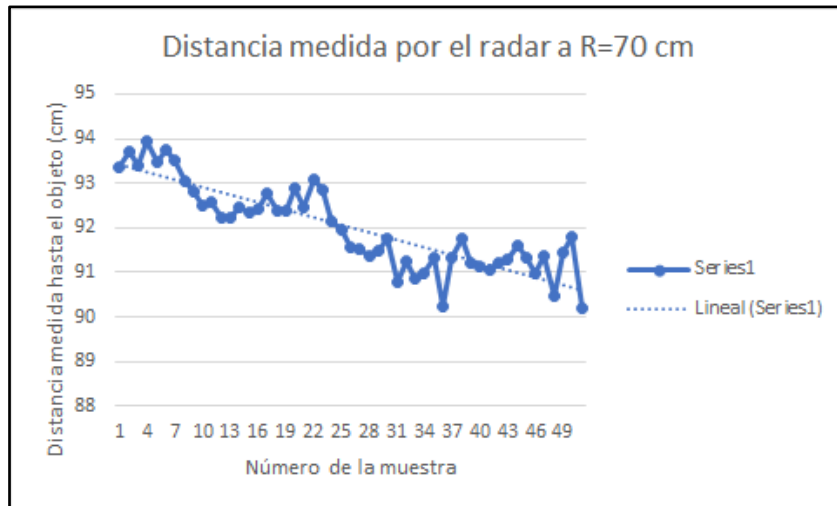


Figura 4.24: Gráfico estadístico de la distancia medida por el radar a $R = 70$ cm.

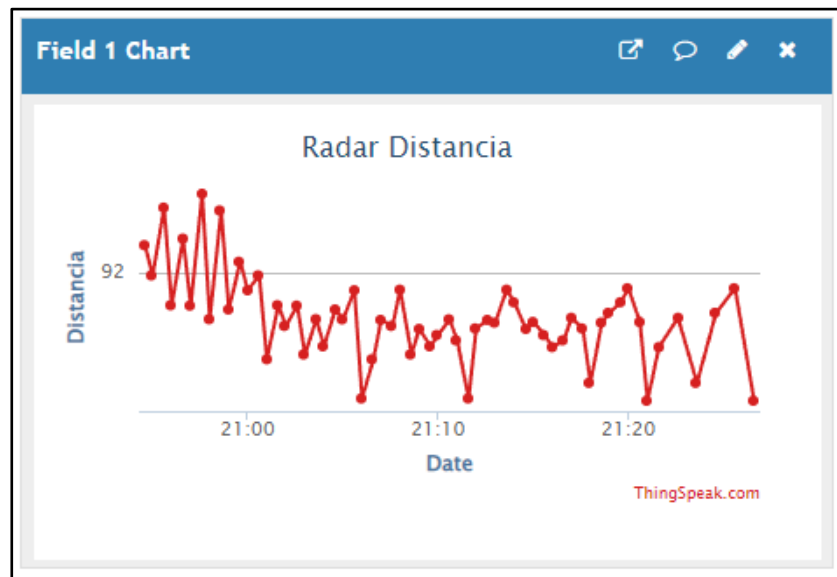


Figura 4.25: Gráfico de ThingSpeak de la distancia medida por el radar a $R = 70$ cm.

El comportamiento que se visualiza en ThingSpeak (ver **Figura 4.27**) revela la tendencia de los datos distar por mucho del valor de distancia de referencia, que en este caso es $R = 70$ cm. A esta distancia se presenta mayor cantidad de valores atípicos que en los escenarios anteriores.

Para finalizar, en la gráfica de las **Figura 4.28 y 4.29** se observa el comportamiento de los resultados conforme aumenta la distancia. Se aprecia tanto un aumento del porcentaje del error, así como un aumento en la desviación estándar.

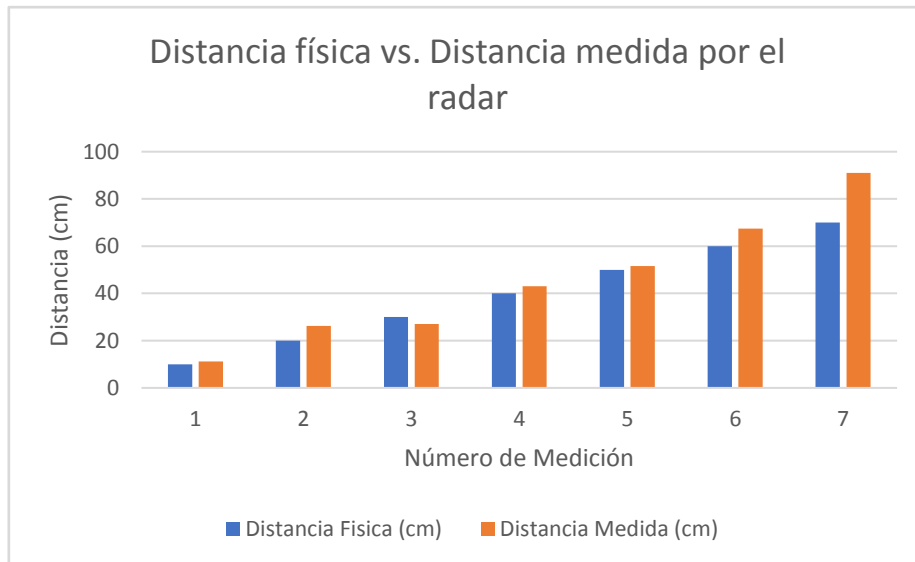


Figura 4.28: Gráfico de Distancia física vs. Distancia medida por el radar.

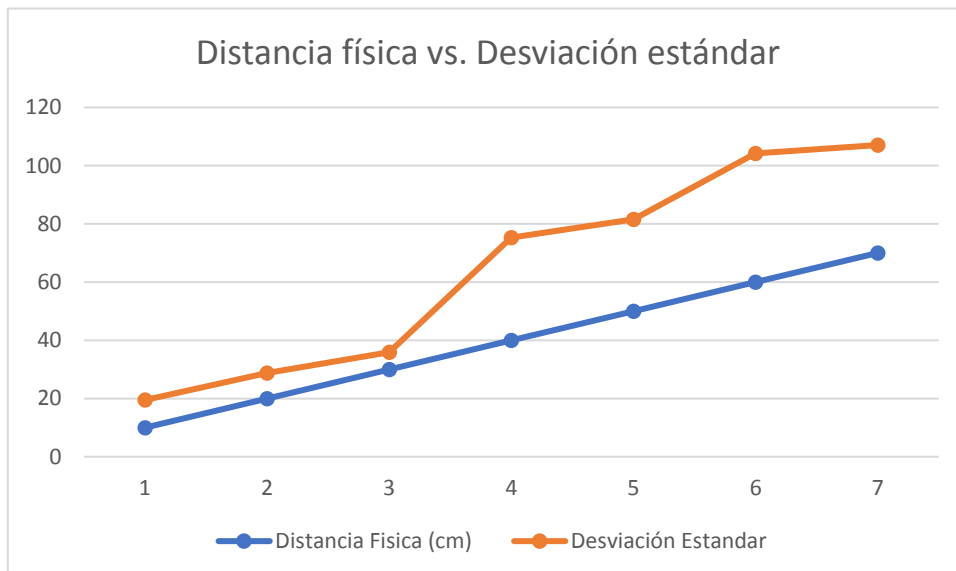


Figura 4.29: Gráfico de Distancia física vs. Desviación Estándar.

5. Conclusiones

Se hizo uso exclusivo de equipos disponibles en el laboratorio de radiocomunicaciones, diseñando el sistema de radar mediante bloques de procesamiento de GNU Radio.

Se logró evitar mediciones atípicas de distancia obtenida en la cercanía de las antenas gracias al cálculo de la Zona de Fresnel, estableciendo un nuevo origen de mediciones, es decir un nuevo cero a partir del cual se colocó al objeto.

Se comprobó que, al utilizar las antenas tipo bocina, existe mejora en las mediciones respecto del tipo whip debido al patrón de radiación directivo que estas poseen y a su ganancia.

Se logró generar un código de Matlab para la lectura, procesamiento y posterior subida de los datos al servidor de ThingSpeak del valor de distancia medida almacenado en un archivo de tipo binario generado por GNU Radio permitiendo observar la data resultante en un dispositivo remoto.

Se determinó que, para distancias superiores a los 70 cm, se aprecia una dispersión mayor en los valores obtenidos, por lo cual el valor de distancia medida se eleva y la desviación estándar del conjunto de datos cambia de tendencia.

Las gráficas estadísticas de distancia reflejan valores dispersos del sistema de radar, respecto a ello, se logró identificar que la nivelación de las antenas, los efectos ambientales en

el entorno y la reflexión de las ondas con superficies aledañas alteran y afectan negativamente en las mediciones obtenidas.

6. Recomendaciones

Se recomienda el uso de las antenas tipo bocina para la transmisión ya que, ofrecen un patrón de radiación más directivo hacia el objeto con relación a otro tipo de antenas. Geométricamente, a mayor radio de la antena se puede obtener una mayor directividad, en este caso en particular, la ganancia de 18 dB de la antena tipo bocina permite obtener un mayor alcance de detección.

En caso de que las pruebas se necesiten realizar en espacios abiertos, se recomienda verificar las condiciones del entorno previamente a fin de poder procesar los datos con el mayor nivel de precisión posible.

Analizar las propiedades de antenas disponibles en el laboratorio, para prescindir el uso de varias antenas en el sistema, optimizando recursos que se traduce en reducción de costos.

Se recomienda la prueba del sistema en otros dispositivos SDR como los USRP 2920, ya que admiten el uso de antenas MIMO.

Como alternativa, es posible instalar el software de GNU Radio en microcontroladores como la Raspberry Pi, con lo cual incrementan las capacidades de expansión de aplicativos, gracias a un mayor soporte dentro de la comunidad investigativa.

Se recomienda tomar una muestra de 100 mediciones del archivo tipo binario generado por GNU Radio. Esto debido a que la cantidad total de información que contiene originalmente el archivo binario es muy grande para ser procesada por el código de programación en Matlab.

7. Referencias

- [1 M. d. T. d. Ecuador, «Ministerio de Telecomunicaciones - Gobierno del Encuentro,» 2016.
] [En línea]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/2016-un-ano-de-avances-en-las-telecomunicaciones-del-ecuador/>. [Último acceso: 1 11 2021].
- [2 Y. Trujillo, «40 000 cupos universitarios quedan disponibles para el 9 y 10 de octubre,»
] *Diario El Comercio*, 07 Octubre 2021.
- [3 Escuela Superior Politécnica del Litoral, «ESPOL,» ESPOL, 01 Septiembre 2020. [En línea].
] Available: <https://www.espol.edu.ec/es/noticias/espol-cuenta-con-13-carreras-acreditadas-por-abet-la-m%C3%A1s-prestigiosa-acreditadora-mundial>. [Último acceso: 02 Noviembre 2021].
- [4 ESPOL, «Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación FIEC,» 2019. [En línea].
] Available:
<https://www.fiec.espol.edu.ec/resources/carreras/telecomunicaciones/Syllabus/SPA-Syllabus-PROPAGACI%C3%93N.pdf>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [5 E. Research, «USRP N210 Software Defined Radio SDR (Ettus Research),» National
] Instruments, [En línea]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>.
- [6 D. G. L. Charvat, M. J. H. Williams, D. A. J. Fenn, D. S. Kogon y D. J. S. Herd,
] «<https://ocw.mit.edu/resources/res-II-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/>,» *MIT OpenCourseWare, Massachusetts Institute of Technology*, Enero 2011.
- [7 S. Felici Castell, J. Segura Garcia, J. J. Pérez Solano, M. García Pineda y A. Soriano Asensi,
] «Incorporación de Internet de las Cosas (IoT) en la docencia universitaria en dos etapas: hardware y software,» *Congreso Nacional de Innovación Educativa y de Docencia en Red*, p. 10, 19 y 20 Julio 2018.
- [8 A. M. Barreto Chitiva, «Implementación de un Sistema de Radar Móvil usando un Sensor
] Doppler para la Detección de Obstáculos,» Programa de Ingeniería electrónica, Villavicencio, Colombia, 2019.

- [9 Y. Álvarez López y A. Fernando Las-Heras, «Estudio y Evaluación de un Sistema Radar como Práctica de Laboratorio en Ingeniería de Telecomunicación,» *Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación de Asturias bajo los proyectos EQUIP08-06, FC09-COF09-12, EQUIP10-31, y PC10-06 (FLEXANT)*. , vol. 1, nº 1, pp. 308 -313, 2012.
- [1 P. J. Mavares F., «Evaluación de un radar fmcw como herramienta didáctica en las carreras 0] de ingeniería automotriz y telecomunicaciones,» *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 25, nº 1, pp. 70-80, 10 Mayo 2021.
- [1 F. I. Vera Rosales y A. M. Mora Guijarro, «Diseño de un prototipo de pruebas de un radar 1] monoestático utilizando radio definida por software,» Guayaquil, 2017.
- [1 M. Cuno y C. Vladimir, «Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema 2] SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas,» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, 2016.
- [1 Y. a. L. Q. a. F. A. E. Wang, «CW and Pulse–Doppler Radar Processing Based on FPGA for 3] Human Sensing Applications,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, nº 5, pp. 3097-3107, 2013.
- [1 S. Constanzo, «Software-Defined Doppler Radar Sensor for Human Breathing Detection,» 4] *Microwave Sensors for Biomedical Applications*, 2019.
- [1 Y. a. F. A. E. Yang, «Development and Implementation of a Real-Time See-Through-Wall 5] Radar System Based on FPGA,» vol. 47, nº 5, pp. 1270-1280, 2009.
- [1 C. Li, R. GómezGarcía y J. M. M. Ferreras, «Radar Doppler definido por software como 6] sensor de microondas polivalente sin contacto para la monitorización de vibraciones,» *Department of Computer Engineering, Modelling, Electronics, and Systems Science (DIMES), University of Calabria, 87036 Rende, Italy*, vol. 17, nº 1, 2017.
- [1 A. B. Obadi, P. J. Soh, O. Aldayel, M. H. Al-Doori, M. Mercuri y D. Schreurs, «A Survey on 7] Vital Signs Detection Using Radar Techniques and Processing With FPGA Implementation,» *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 21, nº 1, pp. 41-74, 12 February 2021.
- [1 C. Bosquez, F. Vera y A. Mora, «Prototype L-band Bistatic Radar Using Software-Defined 8] Radio,» *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Agosto 2021.
- [1 S. Lal, «An FPGA-based 77 GHzs RADAR signal processing system for,» Sundeep Lal, 9] Ontario, 2010.
- [2 L. Shunxin y W. Yanke, «The Design of Radar Signal Processor Based on FPGA,» Springer-0] Verlag GmbH Berlin Heidelberg 2012, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [2 E. Hernández, V. Kravchenko, V. Ponomaryov, D. Robles Camarillo y L. E. Ramos, «Real 1] Time Signal Compression in Radar Using FPGA,» *Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas CIIES 2008*, vol. 12, nº 3, pp. 131 - 138, 2008.

- [2 C. Gravelle y R. Zhou, «SDR Demonstration of Signal Classification in Real-Time Using Deep Learning,» *2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1 - 5, 9 - 13 Diciembre 2019.
- [2 S. Evanczuk, «Digi-Key Electronics,» Digi-Key Electronics, 19 Febrero 2019. [En línea].
- 3] Available: <https://www.digikey.com/es/articles/use-millimeter-wave-radar-kits-for-fast-development-of-precision-object-detection-designs>. [Último acceso: 18 Octubre 2021].
- [2 J. Colorado, M. R. Pérez Cerquera, I. F. Mondragón, D. Mendez, C. Parra, C. Devia, J. 4] Martínez Moritz y L. Neira, «An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an autonomous drone,» *Advanced Robotics*, vol. 31, nº 18, pp. 1 - 18, 2017.
- [2 D. L. Hong, «Experience of IoT Transceiver with Affordable Software Defined Radio 5] Platform,» *ASEE'S VIRTUAL CONFERENCE*, 22 - 26 June 2020.
- [2 J. Perea, Teoría Electromagnética, Primera ed., Tlalnepantla, Estado de México: Red Tercer 6] Milenio S.C., 2012.
- [2 A. Beléndez, «Efemérides: 150 años de la publicación de la Teoría electromagnética de la 7] luz de Maxwell,» *100cias@uned*, vol. VIII, pp. 130-140, 1 1 2015.
- [2 J. L. Perea Vega, Deducción de la Teoría de Circuitos a partir de la Teoría Electromagnética 8] en Libro de investigación apropiación, generación y uso edificador del conocimiento en ciencias de ingenierías., Viveros de Asís 96, Col. Viveros de la Loma, Tlalnepantla, C.P. 54080, Estado de México: Tercer Milenio, 2012.
- [2 R. F. y. H. Young, Física universitaria con física moderna, Pearson, 2018. 9]
- [3 S. R. Saunders y A. Aragón-Zavala, Antennas and propagation for wireless communication 0] systems, 2nd ed., vol. 2, 2a ed. John Wiley & Sons, 2007, pp. 65 - 72.
- [3 I. A. V. L. M. Sc., «Radio Definido por Software,» *CIEYT*, vol. 1, nº 1, pp. 02 - 04, 2020. 1]
- [3 A.-J. Argüelles-Cruz, J. Román y J. Baigorria, «Diseño de Sistemas Digitales Utilizando 2] FPGA,» *Polibits*, vol. 24, nº 20, p. 15, 2001.
- [3 S. T. C. E. J. A. & C. J. Romero, «Desarrollo de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B 3] utilizando radio definida por software, hardware y software libre,» de *Actas del III Congreso Ecuatoriano de las Tecnologías de la Información*, Cuenca, 2015.
- [3 V. Balseca, «“Sistema de comunicaciones empleando SDR para prácticas multidisciplinarias 4] de la carrera de Ingeniería en electrónica y comunicaciones de la Universidad Técnica de Ambato”,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2021.
- [3 E. E. B. H. J. & F. C. J. A. Cadena Muñoz, «Gestión del espectro radioeléctrico en 5] Colombia,» *Tecnura*, vol. 19, nº 45, pp. 3 - 12, 01 Septiembre 2015.

- [3 C. Amaya, «“Diseño de la red inalámbrica y sistema de seguridad mediante cámaras 6] inalámbricas con monitoreo remoto para el edificio de la empresa metropolitana de obras públicas de Quito (EMOP-Q)”», Escuela Superior Politécnica del Ejército, Quito, 2007.
- [3 A. López, «Redes Zone,» 09 Mayo 2021. [En línea]. Available:
7] <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/bandas-frecuencias-wi-fi/>. [Último acceso: 15 12 2021].
- [3 R. S. y. J. Jewett, Physics for scientists and engineers, Cengage Learning, 2018.
8]
- [3 A. Moreno, «“Modelación del Efecto Doppler Acústico en Medios Dispersivos”», UDEC, 9] Cundinamarca, 2019.
- [4 Instituto Tecnológico de Queretaro, «Instituto Tecnológico de Queretaro ITQ,» 6 8 2018.
0] [En línea]. Available:
http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1202_Comm_Digitales/6_Modulacion_PasaBanda.pdf. [Último acceso: 18 12 2021].
- [4 «“Análisis del desempeño de los esquemas de modulación BPSK y QPSK para diferentes 1] condiciones de canales en sistema GFDM” . ,» *Maskay*, vol. 8, nº 1, pp. 7 - 12, 2018.
- [4 P. A. Lupera Morillo y N. Solano, «Diseño e implementación de un demodulador QPSK 2] utilizando una técnica de tendencia central,» *Maskay*, vol. 9, nº 2, pp. 51 - 57, 2019.
- [4 F. Yubal, «Xataka,» Xataka, 21 Abril 2021. [En línea]. Available:
3] <https://www.xataka.com/basics/tipos-usb-estandares-conectores-caracteristicas-cada-uno>. [Último acceso: 18 12 2021].
- [4 S. Pérez y H. Facchini, Dispositivos y Protocolos en Redes LAN Y WAN, Mendoza, Mendoza:
4] Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza, 2017.
- [4 M. Á. Navas, «Profesional Review,» Profesional Review, 18 Noviembre 2017. [En línea].
5] Available: <https://www.profesionalreview.com/2017/11/18/cuales-principales-protocolos-wifi/>. [Último acceso: 18 12 2021].
- [4 INTEL, «INTEL,» 28 Octubre 2021. [En línea]. Available:
6] <https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/wireless/legacy-intel-wireless-products.html>. [Último acceso: 18 12 2021].
- [4 W. Palm, Matlab for engineering applications, Cuarta ed., McGraw-Hill, 2019.
7]
- [4 J. Benítez Lopez y J. L. Hueso Pagoaga, Introducción a MATLAB, U. P. d. Valencia, Ed.,
8] Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, p. 57.
- [4 I. Challenger-Pérez, Y. Díaz-Ricardo y R. A. Becerra-García, «El lenguaje de programación 9] Python,» *Ciencias Holguín*, vol. 20, nº 2, pp. 1 - 13, 2014.

- [5 J. Llerena Izquierdo, Codifica en Python, vol. 1, Cuenca, Azuay: Universidad Politécnica 0] Salesiana, 2020, p. 154.
- [5 A. C. Pedrera, Arduino para Principiantes, IT Campus Academy, 2017, p. 93.
1]
- [5 E. V. Villada, «Arduino desde cero,» *Sociales, Humanidades y Educación*, vol. 226, p. 48,
2] 2017.
- [5 I. Torres-Rodríguez, Y. Padrón-García, A. Mohamad-Mezher y A. Taboada-Crispi,
3] «Implementación de Filtros FIR Para Procesar Señales Biomédicas con PSoC,» de *VIII Congreso de la Sociedad Cubana de Bioingeniería – Bioingeniería*, Cuba, 2009.
- [5 Mathworks, «Mathworks,» Mathworks, [En línea]. Available:
4] <https://la.mathworks.com/discovery/low-pass-filter.html>. [Último acceso: 27 12 2021].
- [5 R. S. J. Dorf, «Circuitos Eléctricos,» de *Circuitos Eléctricos*, Octava ed.
5]
- [5 J. L. Ojeda Guadamud, «Elaboración de un laboratorio virtual para mejorar el aprendizaje
6] de filtros digitales en DSP en la Facultad Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil,» Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2014.
- [5 M. Sierra Pérez, B. Galocha Iragüen, J. L. Fernández Jambrina y M. Sierra Castañer,
7] *Electrónica de Comunicaciones*, U. P. d. Madrid, Ed., Madrid: Pearson - Prentice Hall, 2003.
- [5 J. J. Moreno Rubio, E. Malver, N. Burgos, J. Rodríguez, J. Salamanca y W. Carrero,
8] «Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN (GaN-based Power amplifiers for microwave applications),» *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 16, nº 1, pp. 21 - 25, 02 Julio 2016.
- [5 F. S. Romero, «HISPASAT en el horizonte de la historia de la comunicación social/Hispatat
9] and the History of Social Communication,» 2006.
- [6 W. Y. Morales Martinez, «Diseño de un amplificador a bajo ruido LNA a una frecuencia de
0] 3Ghz,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Bogotá, 2014.
- [6 D. Vargas González, «Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda
1] W,» Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014.
- [6 C. Martín Serrano, «“Detección y procesamiento de blancos móviles, basado en radar
2] automovilístico”,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2018.
- [6 C. Wolff, «Radar Tutorial,» RadarTutorialEU, 2020. [En línea]. Available:
3] <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp08.es.html>. [Último acceso: 28 Diciembre 2021].
- [6 S. Heuel, «Radar Waveforms for A&D and Automotive Radar,» ROHDE&SCHWARZ, Munich,
4] Germany, 2013.

- [6 J.-R. Yang y S. Hong, «A 24-GHz radar sensor with a six-port network for short-range
5] detection,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, nº 11, p. 2634–2637, 01
Noviembre 2014.
- [6 J. L. Rodríguez Sote, A. López Londoño, C. A. Vega Botero y R. D. Flórez Hurtado, «Sistema
6] de monitoreo y control remoto usando IOT para un regulador de presión,» *Scientia Et
Technica*, vol. 22, nº 4, pp. 391-397, 2017.
- [6 M. Quiñones Cuenca, V. González Jaramillo, R. Torres y M. Jumbo, «Sistema De Monitoreo
7] de Variables Medioambientales Usando Una Red de Sensores Inalámbricos y Plataformas
De Internet De Las Cosas,» *Enfoque UTE*, vol. 8, nº 1, pp. 329-343, 24 Febrero 2017.
- [6 C. A. Naranjo Arévalo y B. D. Tipantiza Armero, «Simulación de un sistema de riego
8] automatizado para un terreno ubicado en Vista Hermosa – Malchingui,» Escuela Superior
Politécnica Nacional, Quito, 2020., 2020.
- [6 Google, «Cloud Google,» Google, 2020. [En línea]. Available: [https://cloud.google.com/iot-
9\] core](https://cloud.google.com/iot-core). [Último acceso: 29 Diciembre 2021].
- [7 Ó. Moreno Sánchez, «IoT con servicios en la nube de Microsoft Azure : diseño y despliegue
0] de una arquitectura IoT para el análisis de datos en tiempo real,» Universidad Politécnica
de Madrid, Madrid, 2017.

8. Apéndice

Líneas de código Matlab

```
%% Líneas de código para procesar datos del archivo binario de
GNURadio Companion
% PROYECTO DE TITULACION
% Autores: Alexander Adrián Herrera Echerry    Pablo David García
Tobar
clc
close all
clear all

%% PROCESAR LOS DATOS DEL ARCHIVO BINARIO
f = fopen('ARCHIVO TESIS', 'rb');
values = fread(f, Inf, 'float');
values = values(1:50,1);
values = abs(values);
dimen = size(values,1);

%% TRANSMISION DE LOS DATOS A THINGSPEAK

tStamps = datetime('now')-minutes(dimen-1):minutes(1):datetime('now');
tStamps = rot90(tStamps,3);
channelID = 1608439;
writeKey = "BY8EVENO7KZ5S227";
thingSpeakWrite(channelID, values(:,1),'TimeStamp', tStamps,
'WriteKey', writeKey);

%% CALCULO DE LA MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL DE LOS DATOS OBTENIDOS

x = mean (values);%Cálculo de la Media
Me = median(values); %Cálculo de la Mediana
S = std(values);%Cálculo de la Desviación Estándar
S2 = S*S;%Cálculo de la Varianza

%% MOSTRAR DATOS ESTADÍSTICOS POR PANTALLA
fprintf("El valor promedio de distancia obtenido por el radar es de %f
cm. \n",x);
fprintf("La mediana de distancia obtenida por el radar es de %f cm.
\n",Me);
fprintf("Desviación Estándar: %f \n",S);
fprintf ("Varianza: %f \n",S2);
```

Muestra de 50 datos de distancia obtenidos del archivo binario generado por el sistema de radar

Para R = 10 cm

17,798189	14,597502	18,451248	27,385101	23,990129	17,874439	3,740028	6,544482	1,200948	13,074349
5,872391	16,016344	15,654593	17,444468	21,122808	14,092552	12,730797	14,135161	15,866783	9,854005
5,484347	3,60535	6,748688	3,800369	15,228549	18,09977	3,502501	15,345682	6,7972496	43,328861

0,503032	3,46597	0,178272	11,950993	4,990313	13,275411	0,419615	31,609858	0,205362	1,035407
2,38825	2,125389	1,550871	1,909473	5,554119	10,554778	32,588955	3,898217	17,778589	5,981238

Para R = 20 cm

19,449965	18,195398	39,34309	17,034374	20,44964	23,435137	19,434345	25,169695	21,175844	19,360929
54,175034	34,137146	25,348343	22,461464	23,835278	19,470417	16,720171	22,883062	19,899481	34,018723
19,140394	33,990738	18,062243	20,237009	26,510418	24,687452	20,575708	18,93881	33,883076	27,558582
22,853325	25,859159	36,224373	21,600134	25,744141	41,66925	21,954561	25,39728	25,427702	37,790688
51,125385	21,374796	38,613815	44,301853	25,333059	21,917501	17,571321	24,610703	22,369553	20,98432

Para R = 30 cm

32,466057	34,937134	34,312843	34,832096	26,576929	32,836639	23,388744	32,34359	20,533169	34,270775
20,226719	30,339418	36,986633	23,448238	34,010021	24,352186	21,299274	22,883062	31,026848	20,215645
26,375481	22,995094	36,410072	34,9011	31,85692	22,015516	27,015223	23,420038	18,609346	30,94953
22,893766	31,15453	18,921324	22,850397	21,932592	21,470572	20,762499	22,085356	19,888014	29,629536
35,56181	23,012774	33,494801	35,323517	19,939526	21,020365	23,887854	22,145859	33,783257	25,874147

Para R = 40 cm

12,413436	35,070178	96,435394	110,56310	46,612457	27,958303	11,172200	29,664760	27,385396	15,945296
34,201523	74,527817	54,380199	24,255632	31,178967	92,031273	33,943455	41,700520	100,186409	79,812325
13,262558	118,802422	30,478655	29,370956	38,727551	43,090351	106,629364	86,838264	12,448311	75,834991
43,996708	87,405396	46,541718	55,584236	24,834150	28,108625	81,201500	97,016266	69,912422	35,870186
47,818451	93,404572	99,224098	126,251633	21,295551	7,167763	1,110370	12,245598	28,817581	132,819519

Para R = 50 cm

22,386742	59,818359	77,776978	10,623537	39,876751	45,078217	0,387481	63,856941	23,529011	37,582443
55,287777	65,628586	60,710556	27,779011	56,361153	33,920506	46,431190	22,048563	53,723965	66,203491
33,114288	85,585678	4,316589	11,396846	22,612524	62,960258	87,019455	72,291740	49,655910	54,292599
53,681614	74,702530	5,005628	23,014540	58,617020	63,246471	45,473137	1,017079	107,899368	70,940331
15,716684	24,897097	9,791315	67,404877	19,252134	90,381447	32,215984	60,727345	47,128429	30,087667

Para R = 60 cm

72,273636	43,942471	46,974846	56,939178	31,434851	70,762779	60,257004	31,989603	116,296684	61,854099
98,624176	20,816097	25,287359	104,181152	39,025955	6,650176	68,207977	89,942863	101,907204	80,922951
78,966782	78,261795	55,377308	62,333263	86,719475	59,723171	83,970055	35,186985	92,718674	88,784286

135,207031	69,567566	117,252876	57,645748	131,744598	105,798111	17,094103	6,180386	81,815041	10,582528
31,453091	48,884323	89,356674	10,136120	7,329403	87,214317	89,075188	71,421547	46,856091	26,526852

Para R = 70 cm

93,377808	93,695984	93,414558	93,937691	93,484840	93,731407	93,534317	93,041618	92,814514	92,519394
92,562828	92,209549	92,207901	92,458305	92,346771	92,427254	92,790985	92,384285	92,383240	92,906296
92,474388	93,099815	92,867592	92,151543	91,961143	91,544884	91,539558	91,350632	91,485970	91,754150
90,791534	91,256584	90,858528	90,972176	91,348610	90,244987	91,340164	91,762009	91,214706	91,129944
91,055733	91,221916	91,302681	91,587059	91,311501	90,961044	91,369743	90,462013	91,438690	91,781731