

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN RADAR PARA LA
MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE UN OBJETO EN BASE AL EFECTO
DOPPLER, EMPLEANDO RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE
(RDS).**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

MARLON ALEXANDER VARGAS NASNER

DIRECTOR: ROBIN GERARDO ÁLVAREZ RUEDA PH.D.

Quito, febrero 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marlon Alexander Vargas Nasner, bajo mi supervisión.

Robin Álvarez Rueda Ph.D.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Marlon Alexander Vargas Nasner, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Marlon Alexander Vargas Nasner

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia: Ruth, Wilson, John y abuelitos por ser los pilares fundamentales y principal motivo de superación en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme concluir con éxito una etapa más de mi vida. Agradezco infinitamente a mis padres por sus sabios consejos, su amor incondicional y su completo apoyo en cada una de mis metas. A mi hermano por ser una fuente de motivación y alegría.

Agradezco también a los profesores de la Escuela Politécnica Nacional y principalmente a mi director de tesis Robin Álvarez por compartir su conocimiento científico, además de su paciencia, apoyo y dedicación durante todo el proceso de desarrollo de mi tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	5
1.3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL RADAR	5
1.3.2 CONCEPTO DE RADAR.....	5
1.3.3 CLASIFICACIÓN DEL RADAR	6
1.3.3.1 Por el tipo de forma de onda	6
1.3.3.2 Por la frecuencia de operación.....	7
1.3.4 RADAR DE ONDA CONTINUA (CW)	8
1.3.4.1 Tipos de configuraciones del Radar.....	10
1.3.5 FUNDAMENTO MATEMÁTICO DEL RADAR DOPPLER CW	13
1.3.6 ESTADO DEL ARTE DE COMPARACIONES DE RADARES CW	15
1.3.6.1 3-D Short-Range Localization Device by Low-Cost CW-Doppler Radar 16	
1.3.6.2 Tracking Multiple Mobile Agents with Single Frequency Continuous Wave Radar	17
1.3.6.3 Implementation of a GNU Radio and Python FMCW Radar Toolkit	18
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1. IMPLEMENTACIÓN	20
2.1.1. FRONT- END ANALÓGICO	21
2.1.1.1. Antena Altelix AD5G23M2	21
2.1.2. FRONT-END DIGITAL.....	23

2.1.2.1.	Adalm PlutoSDR.....	23
2.1.3.	MODELO DE RADAR EN GNU RADIO.....	27
2.1.3.1.	Transmisor.....	27
2.1.3.2.	Receptor	30
2.1.3.3.	Radar Doppler en GNU Radio	33
2.1.3.4.	Almacenamiento de datos.....	36
2.1.3.5.	Análisis y procesamiento de las señales en Matlab.....	37
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1	COMPROBACIÓN DE LA PRESENCIA DEL EFECTO DOPPLER EN LAS ONDAS REFLEJADAS	41
3.1.1	SEÑAL COSENO TRANSMITIDA	42
3.1.1.1	Valores teóricos	42
3.1.1.2	Valores experimentales	43
3.2	CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DOPPLER	47
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
4.1.	CONCLUSIONES	56
4.2.	RECOMENDACIONES	57
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXOS	60

RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en el diseño de un radar basado en radio definido por software que además de ser capaz de detectar objetivos en movimiento, tiene como principal objetivo medir su velocidad, para lo cual se utilizó la teoría de ondas electromagnéticas en general y de efecto Doppler en particular.

Para la implementación de este radar se utilizaron los siguientes elementos: un equipo portátil de Radio Definido por Software Adalm-PlutoSDR, dos antenas parabólicas Altelix de la serie ad5g23m2-2pk ubicadas en un mástil, una encargada de transmitir y otra de recibir la onda electromagnética; y un ordenador portátil. Para operar el dispositivo SDR e implementar el programa de radar se utilizó el software libre GNU Radio, este software permite configurar tanto transmisor como receptor, visualizar el fenómeno característico del efecto Doppler y grabar las señales de datos para su análisis.

Para obtener la velocidad, la señal de datos almacenada es analizada en tiempo diferido en el software MatLab de Mathworks.

Las pruebas de campo realizadas para este proyecto de titulación se realizaron utilizando un automóvil, tomando ventaja de que éste posee un tacómetro, el cual facilitará la medición de la velocidad al momento de pasar por las antenas y el cálculo del error en la medición. Esto se lo realizó considerando tres escenarios: cuando las antenas tienen un ángulo de apuntamiento de cero, treinta, y cuarenta y cinco grados. En cada uno de estos escenarios se consideraron las velocidades de 20, 40 y 60 Km/H con el fin de facilitar el entendimiento del efecto doppler.

PALABRAS CLAVE: Radar, Efecto Doppler, SDR, GNU Radio, MatLab.

ABSTRACT

The present job consists of the design of a radar based on software defined radio that in addition to being able to detect moving targets, has the main objective of measuring the speed of a target of interest, for which the theory of electromagnetic waves, digital signal processing and Doppler effect were used.

For the implementation of this radar the following elements were used: one software defined radio portable device Adalm-PlutoSDR, directional antennas Altelix ad5g23m2-2pk, a laptop and a mast. The open source software GNU Radio was used to develop the radar program and manage the SDR device. This software allows the configuration of the transmitter and receiver, visualize the characteristic phenomenon of Doppler effect and save the data signal for its analysis.

In order to obtain the speed, the data signal is analyzed off-time in MatLab by Mathworks, so we gain greater control over signal processing and information visualization.

The field tests carried out for this degree project were developed using an automobile, taking advantage of the fact that it has a speedometer, which will facilitate the measurement of speed when passing through the antennas and the calculation of the measurement error. This was done considering three scenarios: when the antennas have a pointing angle of zero, thirty, and forty-five degrees. In each of these scenarios, speeds of 20, 40 and 60 km/H were considered in order to facilitate the understanding of the Doppler effect.

KEYWORDS: Radar, Doppler Effect, SDR, GNU Radio, MatLab

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se identifica al “Alto grado de accidentabilidad en el tránsito terrestre” como un problema grave que afecta directamente al bienestar de la población, es por eso que el informe de **Estado de la Seguridad Vial en la Región de las Américas (2019)** declara que las muertes causadas por el tránsito son la segunda causa principal de mortalidad en adultos jóvenes de 15 a 29 años de edad [1]. Es necesario aclarar que los países de medianos ingresos económicos presentan las tasas más elevadas de muertes y traumatismos causados por accidentes de tránsito, en comparación con países más desarrollados de altos ingresos, por lo tanto, es necesaria la implementación de proyectos orientados a lograr la minimización de los mismos. Las únicas instituciones con la autoridad de realizar investigación y control del tránsito vehicular en todo el territorio nacional son, la Agencia Nacional de Tránsito en áreas urbanas y la Comisión de Tránsito del Ecuador en las carreteras, el fortalecimiento de estas instituciones en el aspecto tecnológico es imprescindible, con el fin de facilitar y optimizar su labor [2].

Los operativos que se efectúan en la actualidad para realizar controles de los límites de velocidad de circulación vehicular se ven limitados por el uso de dispositivos fijos (detectores de velocidad instalados en carreteras) o de pocas prestaciones (pistola de velocidad) [2].

En la vida cotidiana varias aplicaciones del radar son muy importantes y necesarias; desde detectores de movimiento (propósitos civiles) hasta el direccionamiento en la navegación de aeronaves. El radar es un sistema electromagnético usado para la detección y ubicación de objetivos. Éste transmite un tipo de forma de onda particular para analizar la naturaleza del eco de la señal [3]. Dado que la tecnología de radar se basa en la teoría de radio, y debido a que la Radio Definida por Software (RDS) es una tecnología emergente que incursiona principalmente en la industria inalámbrica, éste tiene un gran potencial para ser utilizado en diferentes campos de investigación que requieran un análisis de la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas, como es el caso de los radares [4].

Este proyecto de titulación pretende diseñar e implementar un tipo de radar basado en el efecto Doppler, el cual integrará una laptop, un equipo RDS y dos antenas, una transmisora y otra receptora. Usando este diseño de radar se realizará la adquisición, almacenamiento y análisis en tiempo diferido de la señal recibida y se demostrará que la velocidad del objetivo en movimiento es directamente proporcional a la diferencia de frecuencia transmitida y recibida.

Este proyecto servirá de base para trabajos futuros en los que se trate de implementar este sistema de radar, con mediciones de velocidad en tiempo real y que integren las mismas funciones de los radares instalados en carreteras con la movilidad de las pistolas de velocidad, así como también funciones adicionales como captura de fotos y posicionamiento.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto técnico es: implementar un radar para la medición de velocidad de un objeto en base al efecto Doppler en tiempo diferido, empleando Radio Definida por Software (SDR, Software Defined Radio).

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

1. Diseñar e implementar el Transmisor del RADAR con SDR.
2. Diseñar e implementar el Receptor del RADAR con SDR.
3. Integrar el Transmisor y el Receptor de modo que se pueda adquirir y grabar la señal producto del reflejo de la onda sobre el objetivo en movimiento.
4. Analizar las señales grabadas en tiempo diferido de modo que, empleando los algoritmos adecuados (dominio de la frecuencia y tiempo-frecuencia), se pueda realizar el cálculo de la velocidad del objeto.
5. Realizar las pruebas necesarias y determinar el error cometido.

1.2 ALCANCE

Nuestro sistema consta de una laptop, un dispositivo SDR y dos antenas, como se muestra en la Figura 1.1

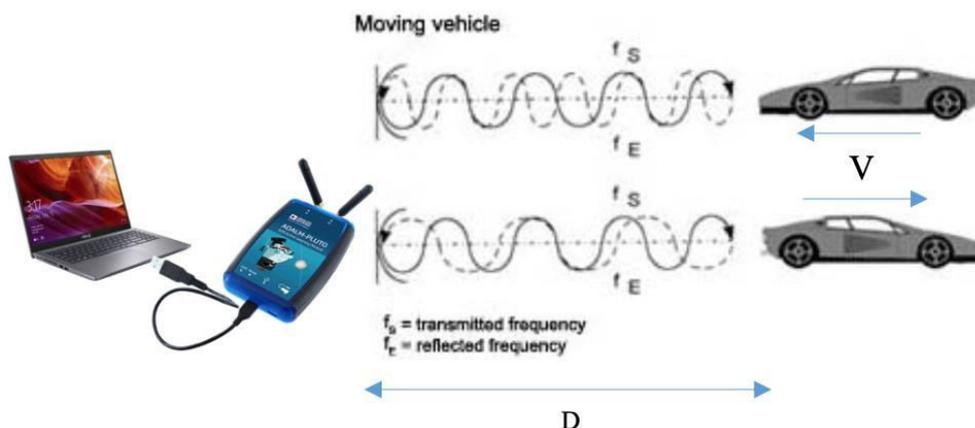


Figura 1.1 Sistema de Radar de velocidades utilizando efecto Doppler

El dispositivo SDR consta de dos puertos para conectar las antenas, uno para la antena transmisora y otro para la antena receptora, las cuales funcionarán de manera simultánea.

El generador de onda se implementará en software. Por lo tanto, se puede escoger una forma de onda cualquiera, así como también sus características; como amplitud y frecuencia. Esta forma de onda se enviará al transmisor, el cual debe funcionar a una frecuencia de transmisión que sea compatible tanto con el dispositivo SDR y con las antenas adquiridas.

Las antenas escogidas presentan una alta directividad y trabajan a una frecuencia en el orden de los GHz, su tamaño permite un fácil manejo para la realización de las pruebas y tiene un costo accesible. Debido a que el transmisor del dispositivo SDR funciona en un rango de frecuencias de 325 a 3800 MHz en su rango normal mientras que en el rango extendido desde 70 a 6000 MHz [5] y las antenas tienen un rango de frecuencia de 4900 a 6400 MHz [6], se ha escogido la frecuencia de 5500 MHz como frecuencia de portadora del sistema.



Figura 1.2. Antenas Aitelix ad5g23m2-2pk [6].

Debido a la frecuencia de 5500 MHz escogida para el funcionamiento del sistema y considerando que la velocidad a la que viaja la onda es la velocidad de la luz representada como c , se puede deducir mediante la ecuación de la longitud de onda (1.1)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

que el objeto más pequeño que puede ser detectado a esta frecuencia tiene como tamaño mínimo de:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{5.5 \times 10^9} = 5.4545 \text{ cm} \quad (1.2)$$

Si bien es posible realizar la detección de cualquier objeto con un tamaño mayor a 5.5 cm, en el presente trabajo se ha escogido un vehículo. Al utilizar un vehículo cualquiera como objetivo de prueba se puede conocer su velocidad verdadera por medio del tacómetro, esto permitirá determinar el error cometido por el sistema de radar desarrollado.

La onda reflejada por el objetivo será captada por el receptor del dispositivo SDR y almacenada en un archivo (.dat). El procesamiento de la señal almacenada se realizará en tiempo diferido para poder encontrar la velocidad con la que cruzó el vehículo.

Este radar usa la frecuencia Doppler para obtener la velocidad radial del objetivo (range rate). El fenómeno Doppler describe el cambio en la frecuencia central de la forma de onda incidente debido al movimiento del objetivo con respecto a la fuente de radiación. Dependiendo de la dirección de movimiento del objetivo, este cambio de frecuencia puede ser positivo o negativo [7].

Debido a que el objetivo de este trabajo es determinar la velocidad de un vehículo, una vez que se haya diseñado el radar, se procederá con la toma de datos a una velocidad conocida con el fin de poder visualizar las diferentes características que presenta el efecto Doppler a diferentes velocidades. De la teoría del efecto Doppler, se espera demostrar que el desplazamiento de la frecuencia reflejada respecto de la incidente es proporcional a la velocidad del vehículo. Es importante recalcar que el procesamiento de la información recolectada y la obtención de la velocidad a partir de esta se la realizará en tiempo diferido.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL RADAR

La palabra *radar* fue originalmente el acrónimo para “Radio Detection And Ranging”. Los Sistemas de Radar han evolucionado desde sus primeros días donde sus funciones se veían limitadas a la detección de objetivos y determinación del rango del objetivo, por el contrario, los radares modernos son sistemas transductor/computador sofisticados que también son capaces de rastrear, identificar, mostrar y clasificar objetivos mientras suprimen fuertes interferencias no deseadas como ecos del ambiente (conocidos como clutter) y señales ajenas al sistema (jamming) [8].

1.3.2 CONCEPTO DE RADAR

Un radar es un sistema eléctrico que transmite ondas de radiofrecuencia (RF, Radio Frequency) electromagnéticas (EM, electromagnetic) hacia un área o región de interés donde se recibe y detecta ondas EM reflejadas por los objetivos de dicha región, este proceso se detalla a continuación:

- El radar irradia energía electromagnética desde una antena de tal manera que se propague en el espacio.
- Parte de la energía irradiada es interceptada por un objeto reflejante, usualmente llamado objetivo, localizado a una distancia del radar (rango).
- La energía interceptada por el objetivo es reflejada en varias direcciones.
- Una parte de la energía reflejada (eco) es devuelta y recibida por la antena del radar.
- Después de la amplificación del receptor y con un apropiado procesamiento de señal se decide si el eco de la señal esta presente. En ese momento se puede obtener la ubicación del objetivo y posiblemente otro tipo de información, como su velocidad de movimiento [9].

Los objetivos del radar pueden ser aeronaves, barcos o misiles; pero también pueden ser personas, pájaros, insectos, precipitación, características de la tierra (vegetación, montañas, caminos, ríos, edificios, postes de alimentación), mar, hielo, icebergs, meteoros.

Además de medir la distancia al objetivo y su dirección angular, un radar también puede encontrar la velocidad relativa del objetivo ya sea determinando la tasa de cambio del rango medido en tiempo, o mediante la extracción de la velocidad radial de la variación de

frecuencia Doppler del eco de la señal [9]. Este segundo método es el que se utilizará en el desarrollo de este proyecto.

1.3.3 CLASIFICACIÓN DEL RADAR

En general, los sistemas de radar usan formas de onda moduladas y antenas directivas para transmitir energía electromagnética a un volumen en el espacio específico para poder identificar objetivos.

Los radares se pueden clasificar en sistemas terrestres (ground based), aéreos (airborne), espaciales (spaceborne), o marítimos (en barcos). También se pueden clasificar en varias categorías dependiendo de las características del radar, como la banda de frecuencia, tipo de antena, y formas de onda utilizadas. Otra clasificación tiene que ver con la misión o funcionalidad del radar. Esto incluye: clima, adquisición y búsqueda, rastreo, control de incendios, etc.

Comúnmente los radares se clasifican por el tipo de forma de onda que usan, o por la frecuencia de operación [7].

1.3.3.1 Por el tipo de forma de onda

- De Onda Continua (Continuous Wave, CW)

Son aquellos que transmiten energía electromagnética de manera constante, y usan antenas de transmisión y recepción separadas. Los radares CW no modulados pueden medir precisamente la velocidad radial del objetivo (Doppler shift) y su posición angular. La información correspondiente al rango de dicho objetivo no puede ser extraída sin aplicar algún tipo de modulación en la onda transmitida. El uso principal de los radares CW no modulados es el seguimiento y determinación de velocidad de objetivos y en la guía de misiles.

- Radares de Pulso (Pulsed Radars, PR).

Los radares de pulso a diferencia de los radares CW usan un tren de pulsos como forma de onda (principalmente utilizando modulación). En esta categoría, los sistemas de radar pueden ser clasificados según la Frecuencia de Repetición del Pulso (Pulse Repetition Frequency, PRF), como radares de PRF bajo, y PRF alto. Los radares de PRF bajo son principalmente utilizados para determinar la distancia de un objetivo en donde su velocidad (Doppler Shift) no es de interés. Los Radares de PRF alto en cambio son utilizados para determinar la velocidad del objetivo.

Tanto los radares de onda continua como los de pulso pueden determinar la distancia y la velocidad radial utilizando o no esquemas de modulación apropiados según se requiera.

1.3.3.2 Por la frecuencia de operación

Según su frecuencia de operación, los radares se clasifican como sigue; los radares HF (High Frequency) utilizan la reflexión de ondas electromagnéticas en la ionósfera para la detección de objetivos más allá del horizonte. Los radares que se ubican en bandas VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency) son usados para radares de detección de rango de largo alcance EWR (Early Warning Radars). Los radares en la banda L son principalmente sistemas terrestres y de barco que se utilizan en operaciones militares de búsqueda de control de tráfico aéreo y de largo alcance. La mayoría de los radares de medio alcance en tierra y en barco operan en la banda S, mientras que la mayoría de radares utilizados en la detección del clima son de banda C. La banda X se utiliza en radares cuyo tamaño de antena constituye una limitación física. Los radares con frecuencias superiores (Ku, K y Ka) sufren graves atenuaciones atmosféricas y por el clima, es por eso que están limitados a aplicaciones de corto alcance.

La tabla 1.1. muestra la clasificación de radares según su frecuencia de operación.

Tabla 1.1. Bandas de frecuencia de radar [7]

Letter designation	Frequency (GHz)	New band designation (GHz)
<i>HF</i>	<i>0.003 - 0.03</i>	<i>A</i>
<i>VHF</i>	<i>0.03 - 0.3</i>	<i>A<0.25; B>0.25</i>
<i>UHF</i>	<i>0.3 - 1.0</i>	<i>B<0.5; C>0.5</i>
<i>L-band</i>	<i>1.0 - 2.0</i>	<i>D</i>
<i>S-band</i>	<i>2.0 - 4.0</i>	<i>E<3.0; F>3.0</i>
<i>C-band</i>	<i>4.0 - 8.0</i>	<i>G<6.0; H>6.0</i>
<i>X-band</i>	<i>8.0 - 12.5</i>	<i>I<10.0; J>10.0</i>
<i>Ku-band</i>	<i>12.5 - 18.0</i>	<i>J</i>
<i>K-band</i>	<i>18.0 - 26.5</i>	<i>J<20.0; K>20.0</i>
<i>Ka-band</i>	<i>26.5 - 40.0</i>	<i>K</i>
<i>MMW</i>	<i>Normally >34.0</i>	<i>L<60.0; M>60.0</i>

Considerando las clasificaciones por el tipo de forma de onda y por la frecuencia de operación, la clasificación a la que pertenece nuestro modelo sería un radar de onda continua (CW) de banda C para tener concordancia con el tipo de onda que se transmite y de la frecuencia de operación de las antenas utilizadas.

1.3.4 RADAR DE ONDA CONTINUA (CW)

Los sistemas de radar de onda continua (CW) transmiten continuamente una señal de iluminación y recibe simultáneamente y de manera continua los ecos de las reflexiones dispersas por los objetos en el entorno. Si el objeto iluminado es estacionario, la frecuencia del eco de la señal no se afectará en comparación con la frecuencia de la señal transmitida. Sin embargo, si el objetivo se encuentra en movimiento, entonces la frecuencia del eco de la señal se verá alterada debido al efecto Doppler. Detectando la frecuencia Doppler, la tasa de cambio del movimiento del objetivo puede ser determinado. Mientras más rápido se mueva el objetivo en una dirección dada, mas grande será su frecuencia Doppler. El funcionamiento del sistema de radar CW se muestra esquemáticamente en la Figura 1.4.

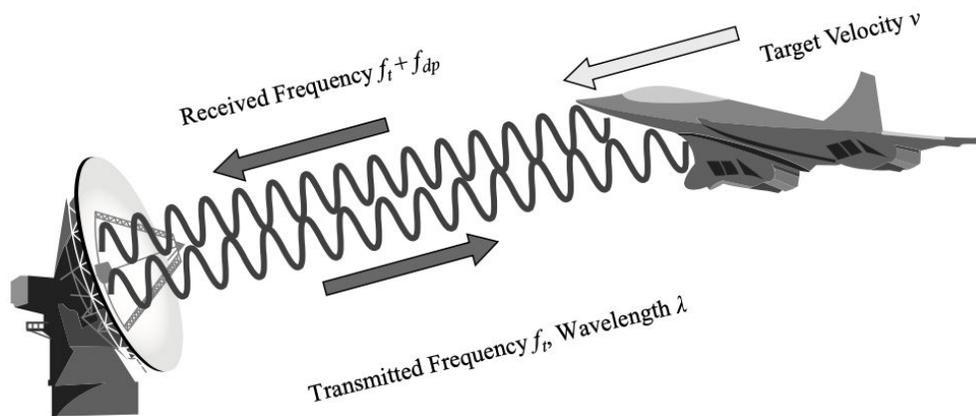


Figura 1.4. Radar CW usando la variación Doppler para detectar un objetivo en movimiento [10].

Los sistemas CW son generalmente usados en aplicaciones compactas, de corto alcance, de bajo costo y generalmente se fabrican con tecnología de estado sólido. Los sistemas de radar CW han sido utilizados en una amplia variedad de aplicaciones como la medición de niveles de líquido industrial en tanques de almacenamiento, determinación de velocidad vehicular para pistolas de velocidad policiales, navegación de corto alcance y control de cruce vehicular. De echo, como los sistemas de radar para automóviles se configuran para ser estándar para cada carro nuevo manufacturado, los sistemas de radar CW pueden convertirse en poco tiempo en la base para cualquier variante del radar.

El efecto Doppler, en el que se basa el radar CW básico, es causado por el movimiento relativo del objetivo. Si se considera la señal en la Figura 1.4, los ecos que son reflejados de regreso al radar son efectivamente comprimidos por la acción del movimiento del objeto (o expandidos si el objeto se estuviera moviendo lejos del radar). Esta compresión reduce la longitud de onda de las señales reflejadas en el receptor, de tal manera que la frecuencia observada esta incrementada. A mayor velocidad del objeto, mayor será la compresión de longitud de onda y por lo tanto se observa un incremento en la variación de la frecuencia Doppler.

La velocidad de un objeto en la dirección radial con respecto al radar se relaciona con la variación de la frecuencia Doppler, f_{Dop} mediante:

$$V = \frac{\lambda f_{Dop}}{2} \quad (1.3)$$

Donde,

V = velocidad radial del objetivo (m/s)

λ = longitud de onda de la señal CW (m), y

f_{Dop} = frecuencia Doppler (Hz).

En otras palabras, la frecuencia Doppler se multiplica por la longitud de onda de la señal transmitida para convertirla en una medida de velocidad, y el factor 2 representa el camino bidireccional recorrido por la señal desde la transmisión hasta la recepción.

El concepto anteriormente descrito es conocido como un sistema de radar CW no modulado en el cual un tono puro es utilizado para medir la variación Doppler de una señal cuando choca con un objeto en movimiento. El inconveniente del sistema de radar CW, radica en que no es posible detectar objetos estacionarios o medir el rango al que se encuentra un objeto (porque el alcance es ambiguo a la longitud de onda). Estas limitaciones pueden ser superadas mediante la modulación de la señal transmitida. La modulación imparte un código de la señal CW como función del tiempo y por lo tanto el rango radial.

Los radares CW pueden utilizar cualquier parte del espectro electromagnético de RF al igual que sus contrapartes pulsadas. Las principales ventajas de los radares CW incluyen su simplicidad, bajo costo, y tamaño reducido. Como los radares CW transmiten continuamente, su potencia pico y potencia promedio son las mismas. Considerando un radar pulsado con un pulso típico de longitud 1 micro segundo y una repetición de pulso de

1.000 Hz. Una potencia pico de 1 kW es requerida para transmitir una potencia promedio de solo 1 W. Un transmisor con un pico de potencia de 1 kW es un sistema complejo y potencialmente costoso. Un radar CW con una potencia de salida pico o promedio de 1 W es sencillo ya que usa una tecnología compacta relativamente sencilla que en ocasiones llega a costar unos cuantos dólares.

Sin embargo, una desventaja que presentan los radares CW es la reducción del rango dinámico debido a la transmisión y recepción simultánea. La transmisión es continua y por lo tanto compite con una señal eco reflejada débil, que puede saturarse fácilmente, evitando así la detección de objetos. El Doppler producido por un objetivo en movimiento ayuda a mitigar esto ya que la transmisión está, en efecto, en cero Doppler. Esto mejora el aislamiento entre las señales transmitidas y recibidas. Con el fin de mejorar la situación, es muy común utilizar antenas separadas para transmisión y recepción arregladas de tal manera que se evite que la señal de transmisión “se filtre” en la antena de recepción. Los objetos cercanos también pueden causar reflexiones en la antena de recepción, ya que estos compiten con los objetos detectados a una mayor distancia y también limitan la sensibilidad a los objetos que se mueven a una baja velocidad. Esto generalmente imparte un límite en la potencia de transmisión máxima por lo que los aumentos adicionales simplemente aumentan la fuga y no dan como resultado un mayor rango de detección. Esta es por mucho la razón por la cual los sistemas de radar CW tienden a ser usados en aplicaciones de corto alcance y, en consecuencia, tienden a tener una baja potencia de transmisión y a ser de un tamaño pequeño.

Otra característica de los radares CW es que ellos pueden operar con una sola fuente de frecuencia sin necesidad de requerir un oscilador local (LO, local oscillator) separado. La potencia de transmisión pico relativamente baja es atractiva para fuentes de transmisión de estado sólido y amplificadores que son inherentemente de potencia pico limitada. Los radares CW también tienen inherentemente una baja probabilidad de interceptación (LPI, Lower Probability of Intercept) ya que los receptores de Medidas de Vigilancia Electrónica (ESM) son activados por la potencia máxima interceptada.

1.3.4.1 Tipos de configuraciones del Radar

Las tres principales configuraciones son:

1. Autodina
2. Homodina
3. Heterodina

La más simple de estas configuraciones es la autodina. Su configuración utiliza un oscilador de funcionamiento libre como fuente de transmisión. La Figura 1.5. muestra el diagrama de bloques que representa la configuración autodina (también llamada oscilador auto mezclable o mezclador auto-oscilante). Mientras que los objetos estacionarios no son detectables dentro de la configuración de este radar, el retorno de la señal de objetos en movimiento experimenta una variación de frecuencia Doppler. Las frecuencias de transmisión y recepción, que son diferentes, son mezcladas a través de las no linealidades del oscilador. Produciendo una frecuencia igual a la variación Doppler.

Esta diferencia de frecuencias, también llamada frecuencia de latido o frecuencia beat pasa a través del acoplamiento capacitivo al radar para el procesamiento de la señal. Los sistemas de velocidad policiaco generalmente usan la configuración autodina. Debido a la configuración simple del radar CW autodino, este tiene una sensibilidad relativamente pobre, ya que el ruido de fondo y la señal recibida compiten con la que se transmite y esto limita la detección de rango y la estimación de velocidad.

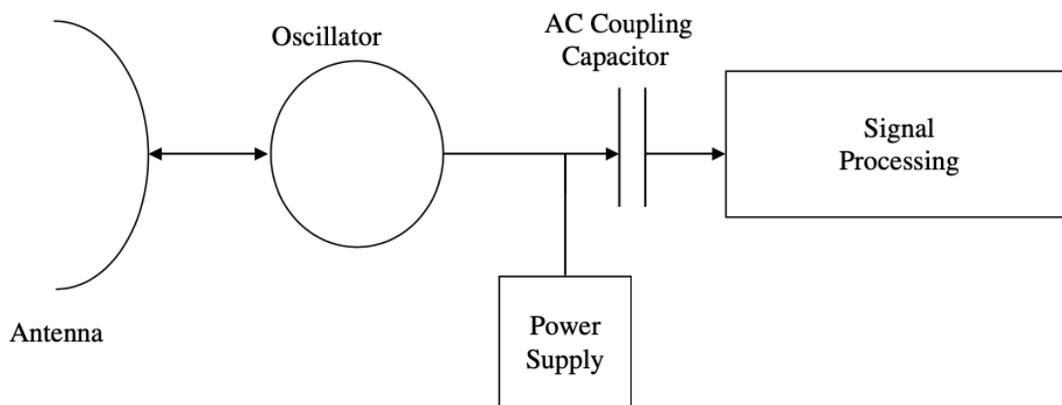


Figura 1.5. Diagrama de bloques del radar CW autodino

En relación con la configuración autodina, la configuración de radar CW homodina ofrece una sensibilidad mejorada debido a que el rendimiento del sistema se ve favorecido cuando se utiliza un mezclador separado y debido al mayor aislamiento entre el transmisor y receptor logrado utilizando antenas separadas, una para cada etapa. La Figura 1.6 muestra el diagrama de bloques del radar CW homodino con la señal transmitida acoplada al mezclador.

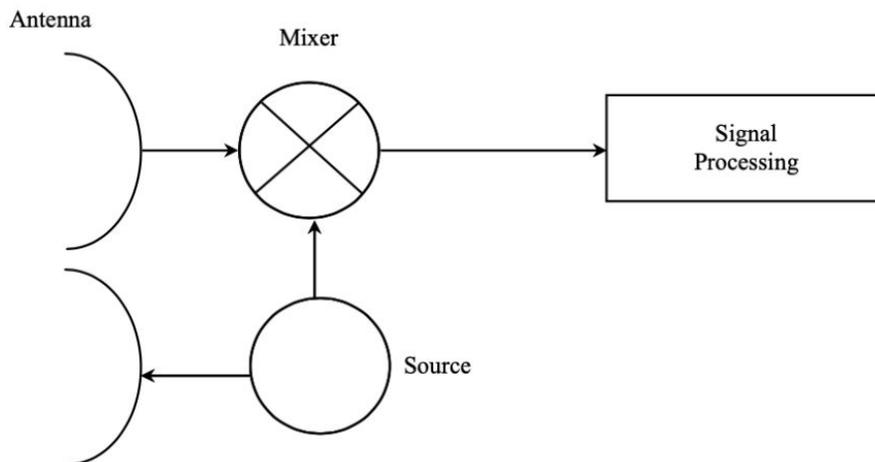


Figura 1.6. Diagrama de bloques del radar CW homodino con antenas separadas para transmisión y recepción.

Todos los enfoques tienen un grado de acoplamiento o fuga que en última instancia limita el aislamiento y, por lo tanto, el rango de detección máximo.

Finalmente, la configuración de radar CW heterodino ofrece otra mejora en el rendimiento, pero a costa de una mayor complejidad. Como se muestra en la Figura 1.7, la modulación de transmisión se imparte a una conveniente frecuencia intermedia (IF) y luego mezclada con el oscilador local a la frecuencia de portadora deseada. La señal recibida es mezclada con el oscilador local, y el procesamiento de la señal se realiza a la frecuencia IF. Una importante ventaja de esta configuración es la de mover la frecuencia de la señal recibida a otra frecuencia lejos de la frecuencia de transmisión porque tanto la modulación de amplitud como la potencia de ruido de modulación de fase de la señal transmitida disminuye con la separación de la portadora.

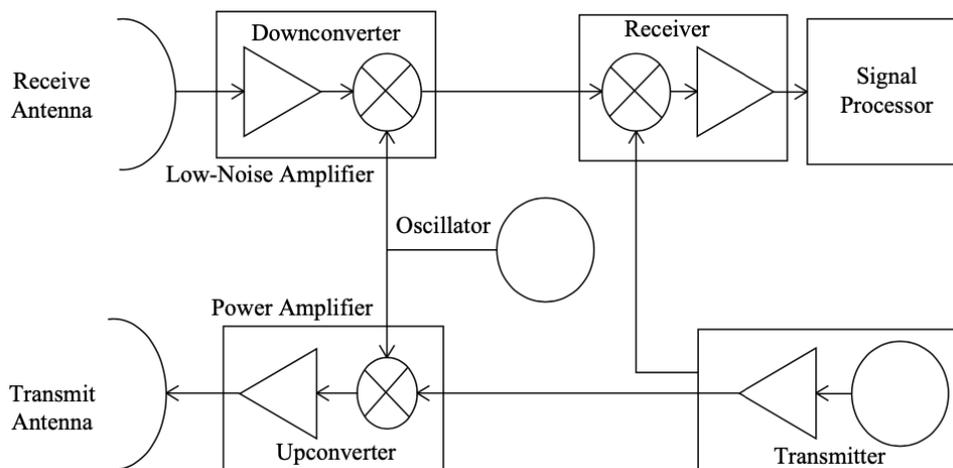


Figura 1.7. Diagrama de bloques del radar CW heterodino

El filtrado ofrece una mejora del rendimiento reduciendo los efectos del ruido de banda ancha. El enfoque de diseño representado en la Figura 1.7. ofrece el potencial para un buen rendimiento con antenas de transmisión y recepción separadas que permiten un buen aislamiento, un amplificador de potencia (PA) de RF para una mayor potencia de transmisión, un amplificador de bajo ruido (LNA) antes del mezclador para una menor figura de ruido, y un mezclado heterodino para una menor amplitud y ruido de fase [10].

Como se verá posteriormente el modelo de radar CW que se ha implementado en este proyecto corresponde principalmente a una configuración homodina debido a que se utilizan antenas separadas. Sin embargo, también tiene características de la configuración heterodina como son los PA, LNA, downconverter y upconverter, las cuales son transparentes al usuario debido a que son implementadas por el dispositivo RDS escogido.

1.3.5 FUNDAMENTO MATEMÁTICO DEL RADAR DOPPLER CW

El rango del objetivo R , hace referencia a la distancia entre el radar y el objetivo. Por lo tanto, la distancia recorrida por la onda del radar hacia el objetivo en movimiento y de regreso al radar es $2R$. El número de longitudes de onda contenidas en una distancia $2R$ es $2R/\lambda$, expresada en radianes $4\pi R/\lambda$, la cual se denomina diferencia de fase.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (1.4)$$

La frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ se relaciona con el ángulo de fase ϕ en la ecuación anterior mediante la siguiente ecuación.

$$\omega = \frac{d\Delta\phi}{dt} \quad (1.5)$$

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\phi}{dt} \quad (1.6)$$

Sustituyendo $\Delta f = f_d$ y $\Delta\phi$ en la ecuación (1.6).

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt}$$

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (1.7)$$

Donde, f_d es la frecuencia Doppler, y V_r es la velocidad radial.

Reemplazando, $\lambda = c/f$ en la ecuación (1.7), se tiene:

$$f_d = \frac{2V_r}{c/f}$$

$$f_d = \frac{2V_r f}{c} \text{ ó } \frac{2f}{c} * V \cos(\alpha) \quad (1.8)$$

Donde, f es la frecuencia transmitida, c es la velocidad de la luz con un valor aproximado de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ y α es el ángulo entre la dirección de propagación de las ondas EM y la dirección de la velocidad del objetivo.

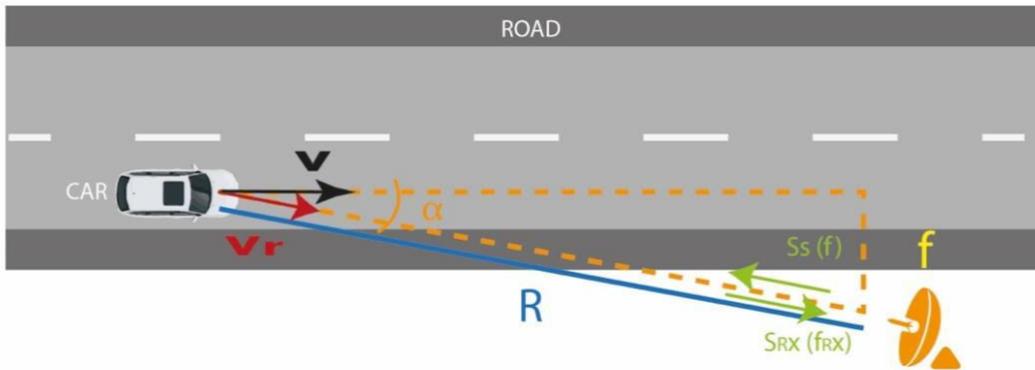


Figura 1.8. Variables involucradas en la medición de la variación Doppler

Tanto la ecuación (1.7) como la (1.8) pueden ser utilizadas para calcular la frecuencia Doppler f_d [11], cuyos parámetros involucrados en el análisis se muestran en la Figura 1.8.

La reflexión de la señal tiene una componente de frecuencia afectada por el efecto Doppler, denotada como $f_{Rx} = f + f_d$ con el fin de obtener la variación Doppler, es necesario multiplicar la señal recibida por la señal generada (transmitida) como se muestra en el siguiente análisis.

Las ecuaciones (1.9) y (1.10) representan la señal transmitida y la señal recibida respectivamente.

$$S_{Tx} = \cos(2\pi f t) \quad (1.9)$$

$$S_{Rx} = \cos(2\pi(f + f_d)t) \quad (1.10)$$

La señal beat corresponde a la multiplicación de la señal transmitida y recibida.

$$\begin{aligned}
 S_{beat} &= S_{Rx} \times S_{Tx} \\
 S_{beat} &= \cos(2\pi(f \pm f_d)t) \times \cos(2\pi ft) \\
 S_{beat} &= \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f \pm f_d + f)t) + \cos(2\pi(f \pm f_d - f)t)] \\
 S_{beat} &= \frac{1}{2} [\cos(2\pi(2f \pm f_d)t) + \cos(2\pi(\pm f_d)t)] \tag{1.11}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, si el objetivo se está moviendo en dirección al radar (i.e. acercándose al radar) la señal beat del radar se representará con la ecuación (1.12).

$$S_{beat} = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(2f + f_d)t) + \cos(2\pi(f_d)t)] \tag{1.12}$$

Por el contrario, si el objetivo se está alejando del radar, la señal beat se representará con la ecuación (1.13):

$$S_{beat} = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(2f - f_d)t) + \cos(2\pi(-f_d)t)] \tag{1.13}$$

Al utilizar la propiedad de las funciones pares se puede observar de mejor manera la diferencia entre las señales beat cuando el objetivo se acerca o se aleja del radar.

$$S_{beat} = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(2f - f_d)t) + \cos(2\pi(f_d)t)] \tag{1.14}$$

Como se puede observar en la ecuación general de la señal beat (1.11), existen dos términos de los cuales será de utilidad únicamente el término que contiene la frecuencia Doppler pura. Por lo que para obtener la variación Doppler que afecta la señal transmitida debido al efecto Doppler, es necesario utilizar un filtro pasa bajos en la señal beat para eliminar la componente de frecuencia indeseada.

1.3.6 ESTADO DEL ARTE DE COMPARACIONES DE RADARES CW

Los pocos documentos encontrados sobre radares CW a diferencia de este proyecto de titulación basan su análisis y resultados en modelos de radares CW de alto costo y de mayor complejidad. Muchos de estos documentos realizan únicamente simulaciones de radares CW, mostrando resultados puramente teóricos. Entre los trabajos más relevantes se tienen los siguientes.

1.3.6.1 3-D Short-Range Localization Device by Low-Cost CW-Doppler Radar

En este paper se pretende realizar la localización de objetivos moviéndose a velocidades entre 200 m/s y 300 m/s a una distancia de pocos metros (corto alcance) en tiempo real utilizando únicamente radares CW de banda X (8 – 12.5 GHz), y un adecuado procesamiento de las señales.

Este sistema consiste en tres radares ubicados en las esquinas del área protegida como se muestra en la Figura 1.9. Asumiendo que la trayectoria del objetivo es una línea recta ortogonal al área protegida y que su velocidad es constante durante el período de observación. Cada uno de los radares mide la variación Doppler, la cual es proporcional a la velocidad radial relativa entre el radar y el objetivo.

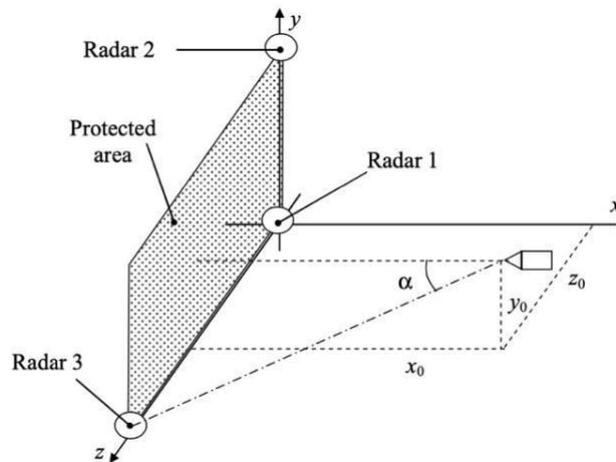


Figura 1.9. Configuración del sistema de detección de objetivos móviles

En primera instancia se expone el principio de extracción de la posición a partir de una señal Doppler. Posteriormente se realiza una comparación entre algoritmos que utilizan este principio para la estimación de la posición con el fin de determinar cuál es el más preciso [12].

Este paper sirvió de referencia para entender el funcionamiento del radar CW en esta aplicación específica. Sin embargo, en nuestro caso debido a que lo que se requiere es la información de la velocidad mas no de la posición, no se empleó lo visto en este paper.

1.3.6.2 Tracking Multiple Mobile Agents with Single Frequency Continuous Wave Radar

En este estudio se muestra el proceso de determinación de ubicación y velocidad de varios objetivos utilizando sensores basados en radares Doppler. En esta aproximación también se incorpora el parámetro DOA (Direction of Arrival) que es la dirección de arribo del objetivo.

Para esto se requiere la utilización de dos sistemas de radar Doppler CW y DOA, por lo que se tendrán dos antenas receptoras ubicadas en diferentes posiciones, separadas a una distancia de media longitud de onda (mostrada en la Figura 1.10), las cuales recibirán las señales reflejadas con una diferencia de fase debido a la ubicación relativa del objetivo. De igual manera la velocidad del objetivo puede ser derivada de la variación Doppler medida entre el objetivo y la dirección de los sensores.

De acuerdo a este trabajo la posición de diferentes objetivos puede ser determinada mediante la medición de las diferencias de fase en cada intervalo de frecuencia Doppler [13].

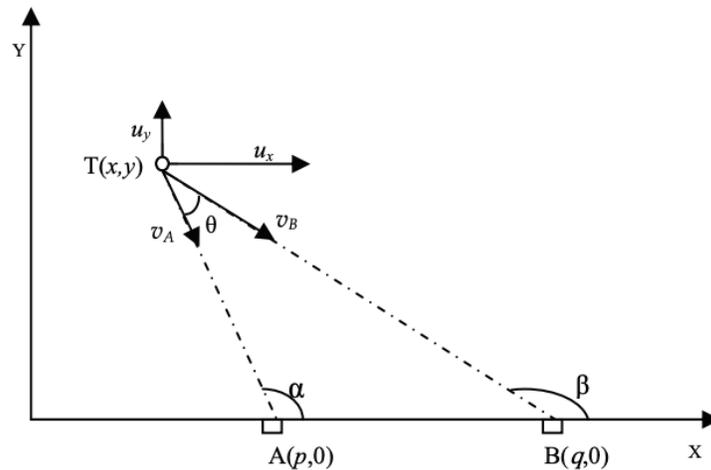


Figura 1.10. Estimación de velocidad y ubicación de un objetivo utilizando dos sistemas de radar (2 elementos receptores)

En este paper se exploran métodos matemáticos que permitan la detección y estimación de ubicación y velocidad de varios objetivos utilizando varios sensores radar dependiendo del número de objetivos que se desee visualizar. A diferencia de nuestro caso que pretende implementar un sistema de radar Doppler concentrándose únicamente en la medición de la velocidad de un solo objetivo.

1.3.6.3 Implementation of a GNU Radio and Python FMCW Radar Toolkit

Este trabajo explora un tipo de radar CW como es el radar FMCW mediante la tecnología de radio definida por software (SDR) con el objetivo de implementar un radar de vigilancia para la detección de drones usando GNU Radio y el dispositivo SDR USRP B210. Este tendrá un alcance de 150 m.

El diagrama de GNU Radio se desarrolló utilizando programación C++ y Python, el cual es el responsable de generar la forma de onda FMCW. El dispositivo SDR B210 se encarga de la transmisión y recepción de la forma de onda, mientras que el proceso de dechirping se realiza utilizando los bloques de GNU Radio.

En la etapa de procesamiento de la señal, la señal transmitida y recibida mostradas en la Figura 1.11 son comparadas y analizadas para obtener su velocidad. Los resultados se muestran en un diagrama posterior a la aplicación de una transformada de Fourier bidimensional. La repetición del pulso de frecuencia se configura a 2200 Hz con un ancho de banda chirp de 20 MHz, con lo cual se puede obtener una resolución máxima de velocidad de 30 m/s [14].

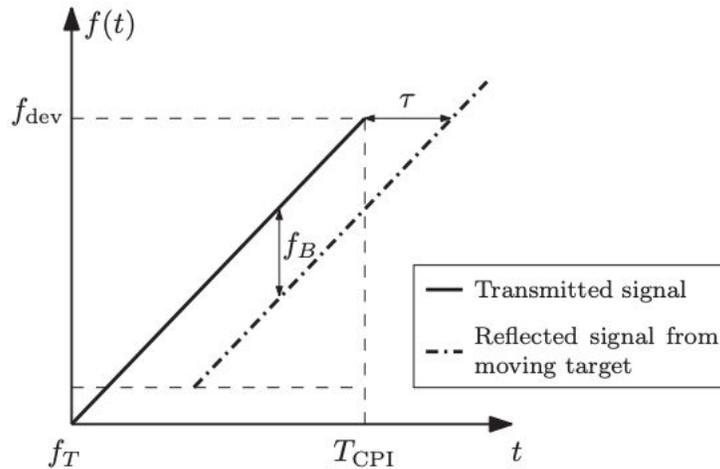


Figura 1.11. Fragmento de la señal triangular enviada y recibida con un desfase temporal.

A diferencia del modelo implementado en nuestro proyecto, este paper utiliza un dispositivo SDR mucho más preciso y complejo, por lo tanto, mucho más costo. Además, de utilizar un radar de onda continua modulada para obtener tanto ubicación como velocidad. La implementación del modelo en GNU radio de este paper sirvió de base para nuestro modelo debido a que al ser radares de onda continua tienen el mismo principio de funcionamiento.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentará la implementación del radar Doppler CW tanto en hardware como en software. Se muestra también el respectivo análisis de la señal reflejada por el objetivo en movimiento en tiempo diferido con el fin de obtener la velocidad del mismo.

Para comprobar la eficacia y utilidad de este modelo de radar se realizaron varias pruebas con el fin de poder comparar las diferentes señales obtenidas a diferentes velocidades y con diferentes ángulos de apuntamiento. Cabe recalcar que este proyecto considera su análisis únicamente para un solo objetivo.

La radio definida por software es un transceiver en el cual la mayoría de los parámetros en las operaciones de radio, que son típicamente implementados en hardware, son implementados en software. El radar Doppler se puede implementar con menor complejidad y con un relativo bajo costo utilizando una plataforma SDR, las cuales representan dos grandes ventajas que facilitan la realización de pruebas y análisis. El software “open source” GNU Radio ofrece un GUI basado en bloques los cuales son capaces de realizar varias tareas, entre ellas la generación y el procesamiento de señales.

Dado que el sistema de radar Doppler CW es implementado en GNU Radio, la transmisión y recepción de las señales de radar se realizan con bloques integrados propios de las librerías de GNU Radio, los cuales admiten varios tipos de dispositivos SDR como LimeSDR, HackRF, RTL-SDR y el dispositivo usado en este proyecto PlutoSDR, el cual también es compatible con la plataforma de MatLab.

Las señales obtenidas en GNU Radio serán guardadas en un archivo .dat y exportadas a Matlab para su posterior análisis y la estimación de la velocidad.

Nuestro modelo de radar consistirá en un diagrama de flujo basado en bloques implementado en GNU Radio capaz de transmitir y recibir señales por medio del dispositivo PlutoSDR y dos antenas conectadas a sus puertos de transmisión y recepción instaladas en un mástil. El dispositivo sobre el cual se ejecuta el diagrama de GNU Radio consta de las siguientes características: Windows 10 Home, Procesador Intel Core i7 @ 2.60GHz y 8 Gb de memoria RAM, mientras que el dispositivo en el que se encuentra instalado Matlab es una MacBook pro Retina, Procesador 2.6 GHz Dual-Core Intel Core i5 y 8 Gb de memoria RAM.

2.1. IMPLEMENTACIÓN

El radar de onda continua de una sola frecuencia es utilizado para determinar la velocidad de un objetivo en movimiento. Esto es posible debido a que el radar transmitirá una onda portadora a una frecuencia fija hacia un cuerpo en movimiento, el cual reflejará una parte de la onda transmitida de regreso al radar. La onda recibida tendrá un cambio de frecuencia en comparación con la onda original. La diferencia en la variación de la frecuencia es conocida como Desplazamiento Doppler. Este efecto se mide en Hz y es proporcional a la velocidad del objetivo, es decir, que mientras más rápido se mueva el objetivo en una dirección dada, más grande será el desplazamiento Doppler. Intuitivamente este no será capaz de medir la distancia a la que se encuentran objetivos estáticos debido a que no hay un desplazamiento Doppler.

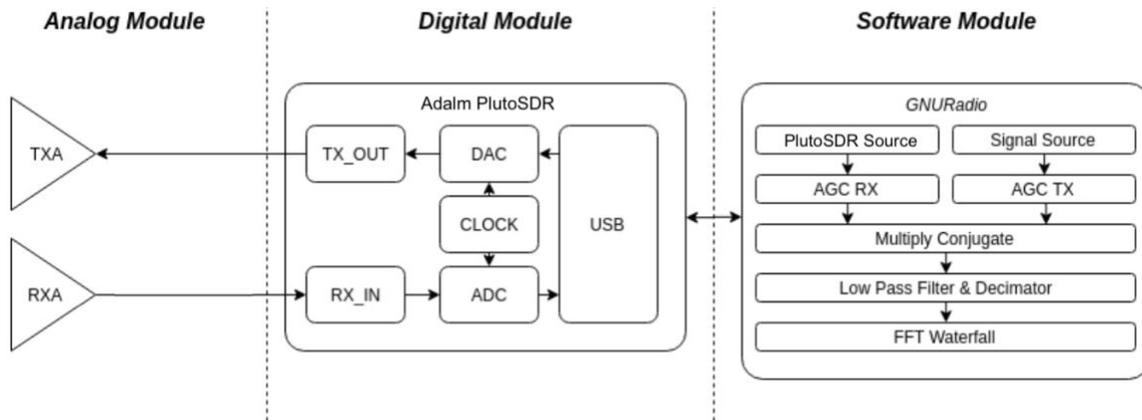


Figura 2.1. Diagrama del Sistema de Radar CW [15].

En el diagrama de la Figura 2.1 se muestra el funcionamiento del sistema implementado. Este sistema se compone de tres partes principales, el Front-End analógico, responsable de la transmisión, recepción y amplificación de la señal; el Front-End digital, compuesto de un dispositivo SDR (Software Defined Radio), capaz de transmitir y recibir simultáneamente una señal. Para este proyecto se ha utilizado el dispositivo SDR ADALM PlutoSDR, dos antenas directivas Altelix y una laptop para la configuración del dispositivo SDR y la visualización y análisis de las señales.

El procesamiento de software corresponde a la tercera parte del sistema y es donde se realizan todos los cálculos necesarios. Para este propósito se ha escogido el software libre GNURadio Companion cuya interfaz gráfica es interactiva y sencilla de utilizar, además de que su compatibilidad con otros tipos de hardware y software libre hacen de este una perfecta herramienta para la realización de prototipos de transmisión y recepción de señales rápidos y eficientes [14], [17], [18].

2.1.1. FRONT- END ANALÓGICO

El módulo analógico es el responsable de emitir y recibir dos señales que son requeridas por este radar. La primera señal es la onda portadora producida por el Front - End digital radiada hacia el objetivo y la segunda es la onda reflejada proveniente del objetivo con un componente añadido que es el desplazamiento Doppler. Gracias al concepto de Radar definido por software, esta es la parte más simple de este diseño.

2.1.1.1. Antena Altelix AD5G23M2

La Antena que ha sido escogida para el propósito de este proyecto es la Altelix AD5G23M2 mostrada en la Figura 2.2 es una antena de plato parabólico MIMO 2x2 dual polarizado de 23 dBi (20.85 dBd) de radomo cerrado. Tiene un sistema de alimentación versátil ajustable que permite configurar la antena para polarización dual (horizontal y vertical) o para polarización X (+ 45 ° y -45 °). Este tipo de antena también es compatible con las nuevas radios de 4.9 GHz y 6.4 GHz ahora disponibles.

La AD5G23M2 presenta un plato de precisión con una aleación de aluminio con revestimiento blanco UV para todas las condiciones climáticas. El diseño envuelto de este plato como se muestra en la Figura 2.6 ayuda a reducir el ruido de RF externo, así como a reducir la propagación de RF en la parte posterior de la antena. Esto es ideal para instalaciones de antenas ubicadas a una corta distancia la una de la otra.

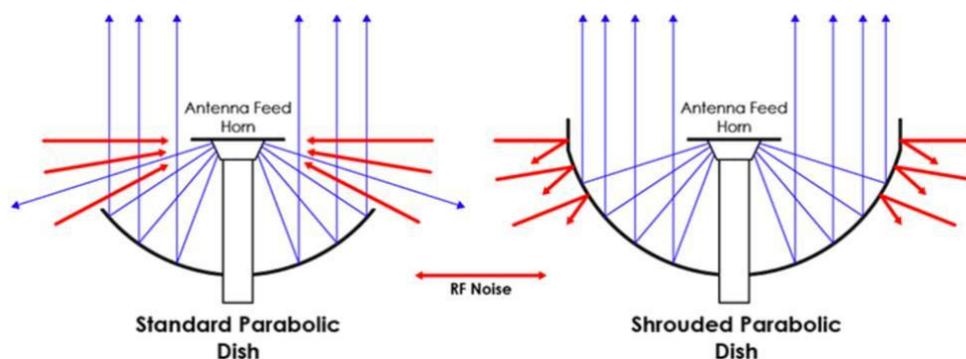


Figura 2.2. Afectación del ruido en antenas con diferente radomo [6].

El plato también presenta un radomo frontal extraíble resistente diseñado para proporcionar protección ambiental adicional al plato y al foco de la antena.

Las características de esta antena son las siguientes [6]:

- Diseño liviano
- Amplia cobertura multibanda (4900 – 6400 MHz)
- Alta ganancia y bajo VSWR
- Plato de precisión de aleación de aluminio con recubrimiento UV blanco
- Sistema de montaje inclinable y giratorio con soportes de radio integrales
- Polarización horizontal, vertical y en X (+45° & -45°)

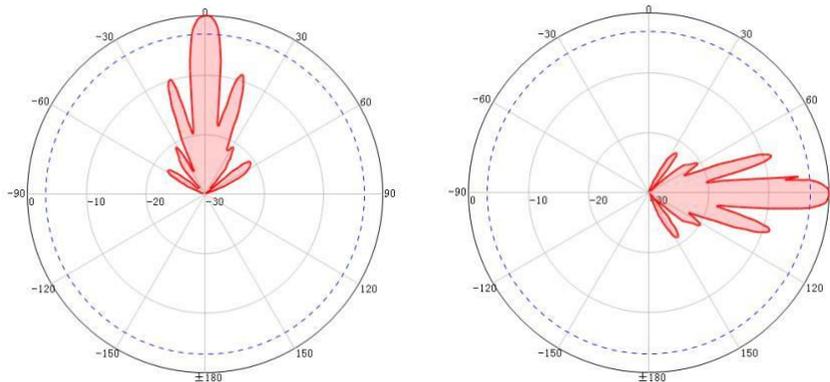


Figura 2.3. Patrón de radiación para polarización horizontal y vertical [6].

Las especificaciones técnicas más importantes de esta antena se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas Altelix ad5g23m2-2pk

Modelo	AD5G23M2
Rango de Frecuencia	4.9 – 6.4 GHz
Ancho de banda	1.5 GHz
Ganancia	23 dBi
Polarización	Vertical & Horizontal o X-Pol (+ 45° & -45°)
Impedancia	50 Ohm
Potencia Máxima	100 Watts
Conector	(2) Tipo N Hembra
Peso	5.8 lb (2.6 Kg)

Cada antena incluye:

- Antena parabólica MIMO polarizada dual Altelix
- Soporte de antena inclinable y giratorio con soporte de radio integral
- Conjuntos de cables de baja pérdida RP-SMA macho a N macho

2.1.2. FRONT- END DIGITAL

Este módulo es una parte esencial de este radar. Es el puente entre el software y el hardware. La señal dispersa proveniente del objetivo es digitalizada para posteriormente ser procesada, y la señal a transmitirse es generada. Todas las señales son enviadas y recibidas por el software mediante una conexión USB.

2.1.2.1. Adalm PlutoSDR

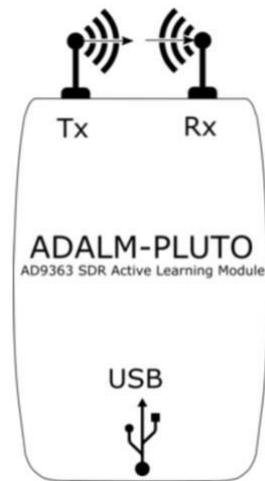
El dispositivo SDR escogido es el ADALM-PlutoSDR. Este dispositivo es un módulo de aprendizaje activo que tiene algunas funciones de una radio definida por software, las suficientes como para ser considerado un dispositivo SDR. Este módulo que brinda la funcionalidad RF/SDR resulta ser muy eficiente para realizar simulaciones de comunicaciones y experimentaciones que involucren la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas.

PlutoSDR consta de dos conectores SMA hembra para la transmisión y recepción, un puerto micro-USB para alimentación adicional, un puerto micro-USB para datos y alimentación y dos LED de aviso de funcionamiento. En la Figura 2.4 se muestra una imagen del dispositivo SDR.



Figura 2.4 Dispositivo de Radio Definido por Software (SDR) ADALM PlutoSDR

El diagrama de bloques básico del ADALM-Pluto es bastante sencillo de entender. Como se muestra en la Figura 2.5, este consta de dos antenas donde la energía de Radio Frecuencia analógica entra y sale, y un único conector USB, donde la información digital ingresa y sale del sistema host. La conexión entre este dispositivo y una laptop se lo realiza mediante un cable con conectores micro-USB y USB en sus dos extremos.



a)



b)

Figura 2.5. a) Diagrama de bloques básico ADALM-Pluto [19] b) Cable PlutoSDR-Laptop.

Las características técnicas de este equipo relevantes para la implementación del radar Doppler CW son las siguientes:

- 1 canal de transmisión y 1 canal de recepción (frecuencias de sintonización separadas)
- Conectores SMA hembra tanto para transmisión como para recepción.
- Rangos de frecuencia de sintonización 325 MHz a 3.8 GHz y en su rango extendido de 71 MHz a 6 GHz.
- Ancho de banda configurable
- DAC (Transmisión) y ADC (Recepción) de 12 bits integrados
- Control de ganancia automático y manual en recepción
- Soporte tanto para GNU Radio como para MATLAB mediante código y bloques para su configuración

El valor de la frecuencia central a la cual funcionará el dispositivo SDR dependerá del transceiver escogido. Así para un rango de frecuencia entre 325 y 3800 MHz con un ancho de banda de 20 MHz se deberá configurar con el transceiver AD9363 (predeterminado) y 70 a 6000 MHz con un ancho de banda de 56 MHz con el transceiver AD9364 [16].



Figura 2.10. Cable coaxial N macho – SMA-PLUG macho

2.1.3. MODELO DE RADAR EN GNU RADIO

GNU Radio es una plataforma que presenta un excelente marco de trabajo para la experimentación en cuanto al procesamiento de señales ya sea para la comunicación o para cualquier otro propósito para el que se requiera la transmisión y/o recepción de ondas electromagnéticas. El diseño del transmisor y receptor consta de varios bloques, cada uno con una o varias funciones específicas (modulación, codificación, etc.). Cada bloque, escrito en C++ o Python, recibe la información a través de un puerto de entrada, esta es procesada y posteriormente expulsada a través del puerto de salida del bloque. El framework de GNU Radio permite la interconexión de entradas y salidas que forman una cadena de bloques para la realización de una o varias tareas específicas. Esta colección de bloques conectados se denomina diagrama de flujo.

Por razones de simplicidad y compatibilidad este radar se ha implementado en GNURadio Companion, que es software libre, el cual ofrece una gran plataforma multi-OS para la creación de prototipos de flujos de trabajo que permiten el procesamiento digital de señales que son fáciles de configurar y personalizar.

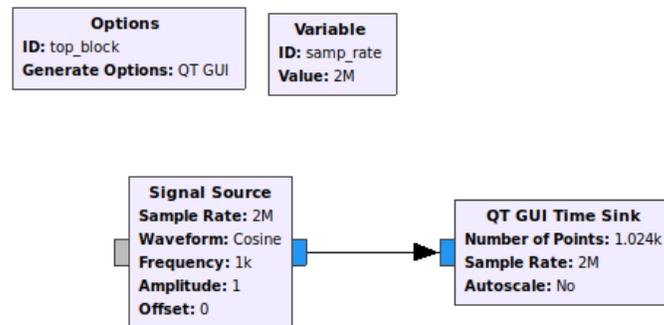
2.1.3.1. Transmisor

La etapa de transmisión consta de un bloque Signal Source, el cual se encarga de generar la señal con una forma de onda, frecuencia y amplitud deseada. Estos parámetros dependerán únicamente de los requerimientos del sistema.

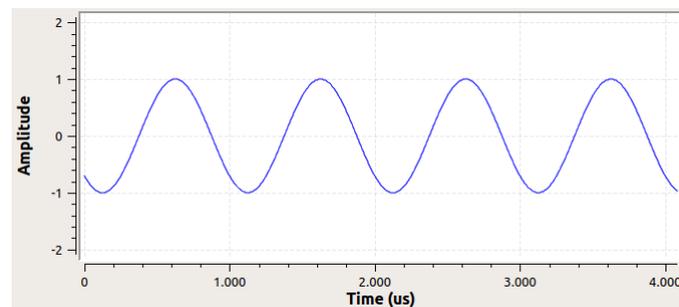
El bloque Signal Source se configura con una onda coseno a una frecuencia de 1 kHz. El bloque QT GUI Time Sink es el encargado de mostrar la representación gráfica de la señal. Para poder observar la señal hay que tener en cuenta ciertos parámetros como la frecuencia de muestreo que en este caso se representa con la variable `samp_rate` y se fija a 2 Msps (Mega muestras por segundo) debido a que la frecuencia de la señal a

transmitirse no superará las unidades de kHz, la frecuencia de muestreo y la frecuencia de la señal transmitida deben cumplir con la relación del teorema de Nyquist. Según el teorema de Nyquist una señal se debe muestrear por lo menos al doble de la frecuencia máxima de la señal, es por eso que la variable `samp_rate` debe fijarse a un valor adecuado.

Para un correcto funcionamiento del modelo el mismo valor de la variable `samp_rate` debe ser configurada en todos los bloques que formen parte del diagrama de flujo.

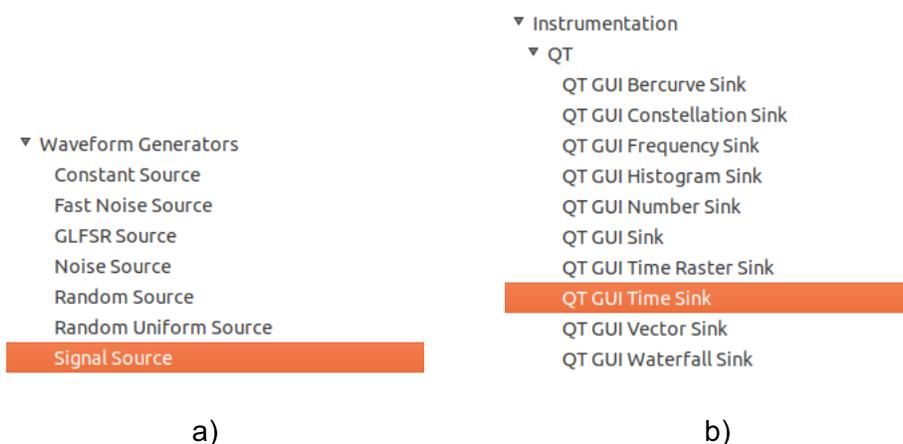


a)



b)

Figura 2.11. Generación a) y visualización b) de una onda coseno.



a)

b)

Figura 2.12. Ubicación de las librerías de los bloques de la Figura 2.11.

Nuestro sistema de radar necesita transmitir la señal generada en una onda portadora a una frecuencia compatible tanto para el dispositivo SDR como para las antenas. La generación de esta señal está a cargo del bloque Signal Source, mientras que su modulación con una onda portadora la realiza el bloque de transmisión del PlutoSDR de manera transparente para el usuario. El diagrama de bloques de la Figura 2.13 muestra la configuración del transmisor del radar Doppler.

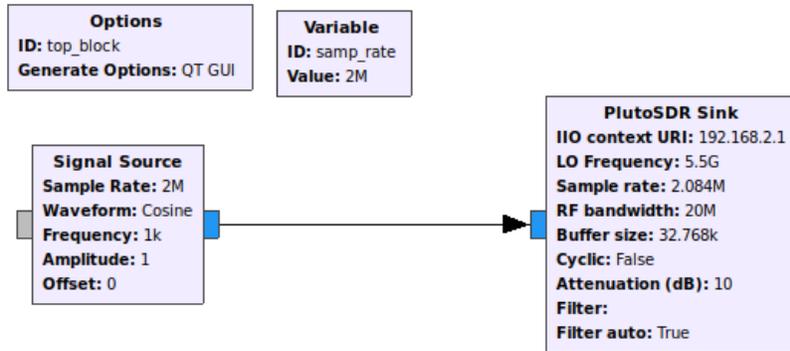


Figura 2.13. Transmisor

El bloque de transmisión PlutoSDR Sink se conecta directamente con el Bloque Signal Source para proceder con el proceso de transmisión. El esquema de la Figura 2.13 generará una onda coseno a una frecuencia de 1 kHz mayor que la frecuencia de transmisión del SDR ($f_t = f_0 + 1e3$) con una tasa de muestreo de 2 Msps.

Como forma de onda a transmitirse se escogió una onda sinusoidal. El valor de la frecuencia escogida (1kHz) está relacionado con la velocidad máxima que se podrá estimar y visualizar según la teoría descrita en la sección 1.3.5. Teniendo en cuenta que como máximo se puede obtener una variación de 1 kHz esta pasaría a ser la máxima variación Doppler posible. Despejando la velocidad radial de la ecuación 1.8 y reemplazando los valores conocidos se tiene:

$$f_d = \frac{2V_r f}{c}$$

$$V_r = \frac{f_d c}{2f}$$

$$V_r = \frac{1 \text{ kHz} \cdot 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 5.5 \text{ GHz}}$$

$$V_r = 27.27 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 98.18 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

De este modo la velocidad máxima que se puede detectar con este modelo es 98.18 Km/h, valor suficiente para la realización de pruebas usando un vehículo como objetivo.

El siguiente paso después de la transmisión de la onda portadora generada es la recepción de la señal dispersa utilizando el mismo dispositivo SDR. Esto se lo realiza utilizando los bloques del SDR ADALM-Pluto propios de la plataforma GNU Radio.

2.1.3.2. Receptor

En el esquema de recepción se utiliza el bloque receptor PlutoSDR Source, en el cual sus parámetros deben estar configurados de tal manera que sean compatibles con el bloque transmisor PlutoSDR Sink.

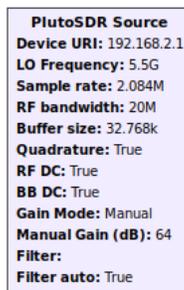
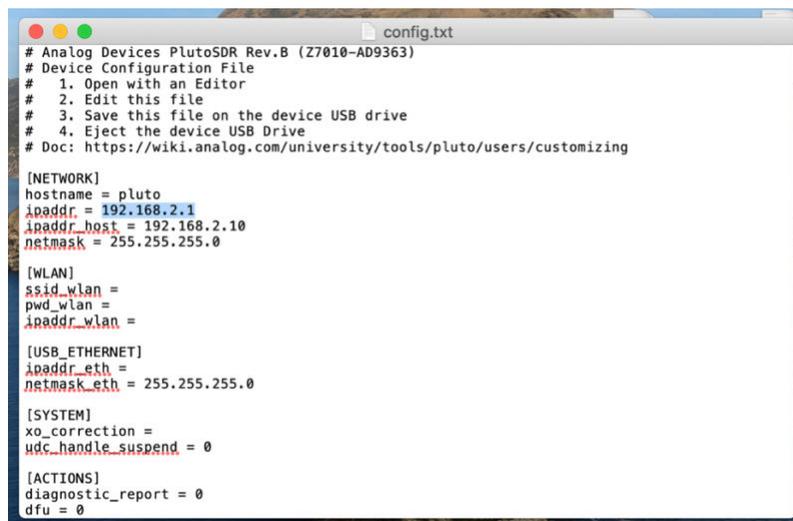


Figura 2.14. Bloque de recepción

El parámetro Device URI de los bloques de Tx y Rx deben ser configurados con la dirección IP correspondiente al dispositivo ADALM-Pluto presente en el archivo de configuración config.txt dentro del dispositivo de almacenamiento PlutoSDR.



```
# Analog Devices PlutoSDR Rev.B (Z7010-AD9363)
# Device Configuration File
# 1. Open with an Editor
# 2. Edit this file
# 3. Save this file on the device USB drive
# 4. Eject the device USB Drive
# Doc: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/customizing

[NETWORK]
hostname = pluto
ipaddr = 192.168.2.1
ipaddr_host = 192.168.2.10
netmask = 255.255.255.0

[WLAN]
ssid_wlan =
pwd_wlan =
ipaddr_wlan =

[USB_ETHERNET]
ipaddr_eth =
netmask_eth = 255.255.255.0

[SYSTEM]
xo_correction =
udc_handle_suspend = 0

[ACTIONS]
diagnostic_report = 0
dfu = 0
```

Figura 2.15. Información del archivo config.txt

La frecuencia de transmisión y recepción de 5.5 GHz (corresponde a un tipo de radar de banda C) debido a que el dispositivo SDR funciona en un rango de frecuencias de 70 a 6000 MHz y las antenas funcionan en un rango de 4900 – 6400 MHz.

Considerando que las pruebas se realizaron a campo abierto un buen nivel de señal en recepción es esencial para la observación y análisis del fenómeno. Es por esto que, en el bloque del transmisor al configurar el parámetro de atenuación, cuyo rango de valores esta entre 0 y – 89.75 dB con una resolución de 0.25 dB, se optó por el valor predeterminado que es -10 dB asegurando una alta potencia en transmisión sin utilizar tampoco su valor máxima para evitar daños en el dispositivo SDR. Del mismo modo en el bloque de recepción se configuró una ganancia de 64 dB teniendo en cuenta que el rango está entre -4 y 71 dB, es importante tener en consideración que para configurar el valor deseado primero se debe configurar el parámetro Gain Mode como manual.

El parámetro ancho de banda de RF tanto para el bloque transmisor como para el receptor filtra el ancho de banda de salida y de entrada respectivamente, debido a que la señal que se envía es apenas de 1 kHz se decidió no modificar el valor de 20 MHz del parámetro que es su valor predeterminado.

Los parámetros restantes se configuraron con sus valores predeterminados.

Los bloques de transmisión y recepción se encuentran en la librería PlutoSDR como se muestra en la siguiente figura.

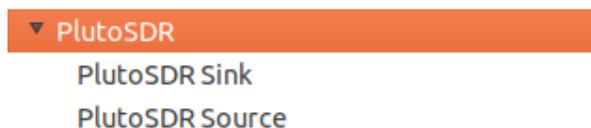


Figura 2.16. Ubicación de lo bloques de transmisión y recepción

A causa de las afectaciones del canal inalámbrico la señal recibida sufrirá una atenuación por lo que, tanto la salida del bloque Signal Source como la salida del bloque de recepción PlutoSDR Source se conectan a un bloque de control automático de ganancia con el fin de asegurar un mismo valor de amplitud en ambas señales y facilitar su comparación de manera visual.

Cabe recalcar que cualquier bloque se encuentra fácilmente digitando su nombre en el símbolo de búsqueda de la interfaz de GNU Radio como se muestra en la Figura 2.17.

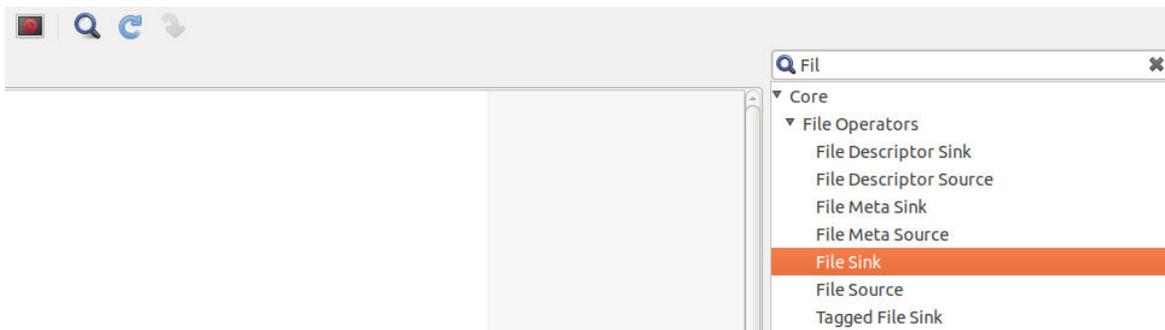


Figura 2.17. Búsqueda de un bloque por su nombre

El modelo de transmisión y recepción implementado en GNU Radio se muestra en la Figura 2.18.

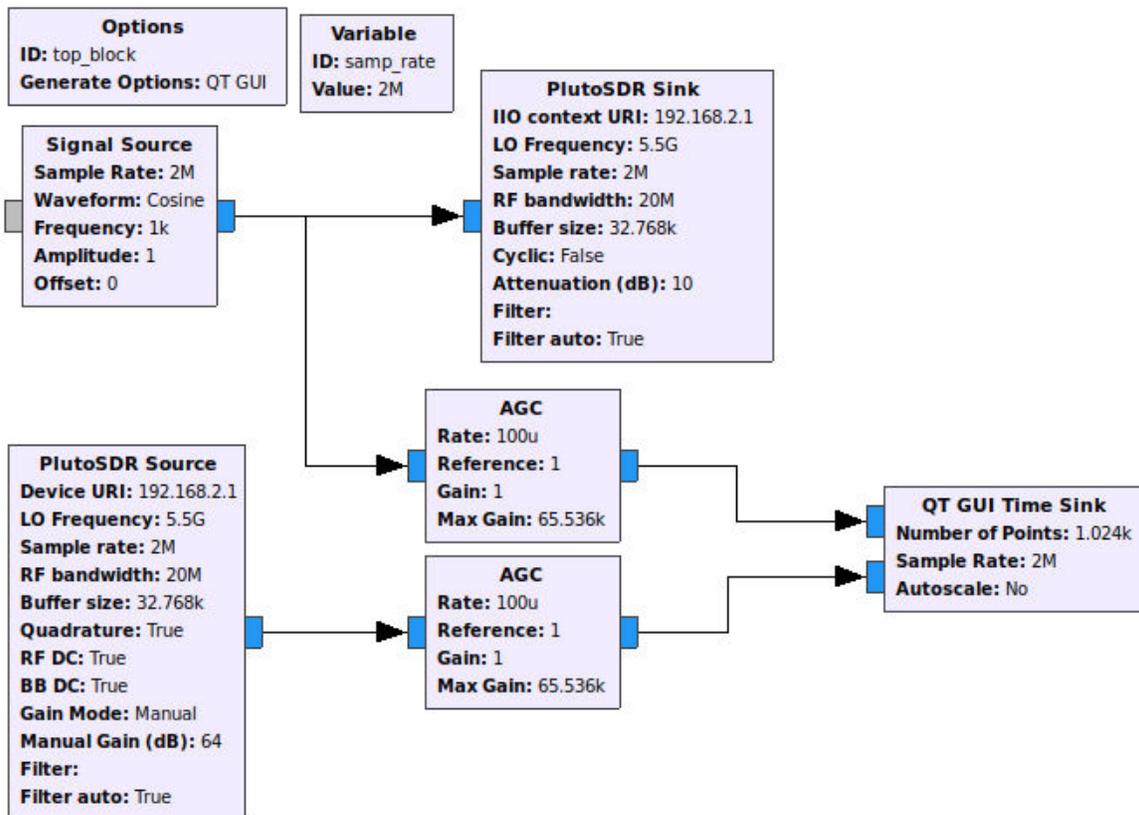


Figura 2.18. Transmisión y Recepción de la señal senoidal

Si la transmisión y recepción se realizaron de manera correcta tanto la señal de referencia transmitida (azul) y recibida (verde) deberán tener un desfase entre ellas producto de la dispersión de la misma con algún objeto reflejante. Como se puede observar en la Figura 2.19 obtenida del bloque QT GUI Time Sink. Es pertinente recalcar que la señal reflejada es modificada por todos los efectos del canal inalámbrico (ver Video 1).

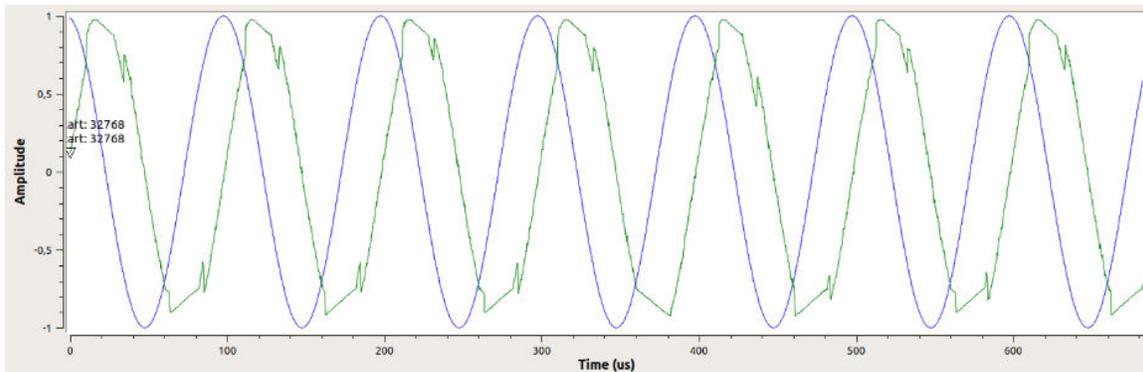


Figura 2.19. Plot del bloque QT GUI Time Sink

2.1.3.3. Radar Doppler en GNU Radio

Para reproducir la teoría descrita en la sección 1.3.4, y poder obtener la variación Doppler de un objetivo en movimiento, estas dos señales son mezcladas por la contraparte digital de un mixer analógico, el bloque Multiply Conjugate, como se muestra en la Figura 2.20. Como su nombre lo indica, este bloque multiplica y conjuga ambas señales generando una tercera señal que es igual a la componente de múltiples desplazamientos Doppler creada por todos los objetos en movimiento captados dentro del patrón de radiación de la antena receptora. Esta nueva señal se la conoce como señal beat.

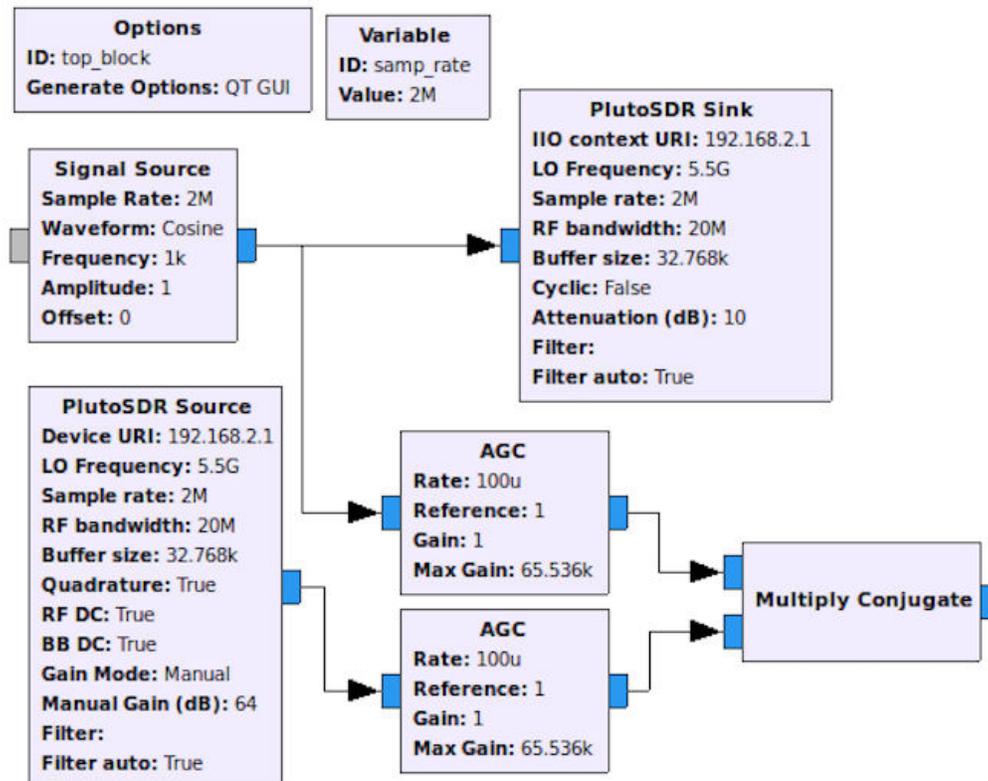


Figura 2.20. Mezclado de las señales de Transmisión y Recepción.

Para motivos de visualización del fenómeno y dado que el desplazamiento Doppler de una señal de 5.5 GHz es pequeño para velocidades terrestres, la salida del mixer tiene que ser muestreada nuevamente a una tasa de muestreo más baja. Para ello se conecta un filtro pasa bajos al bloque Multiply Conjugate. Este bloque realiza un proceso de decimación y filtrado a los 2 msp en 2048 veces.

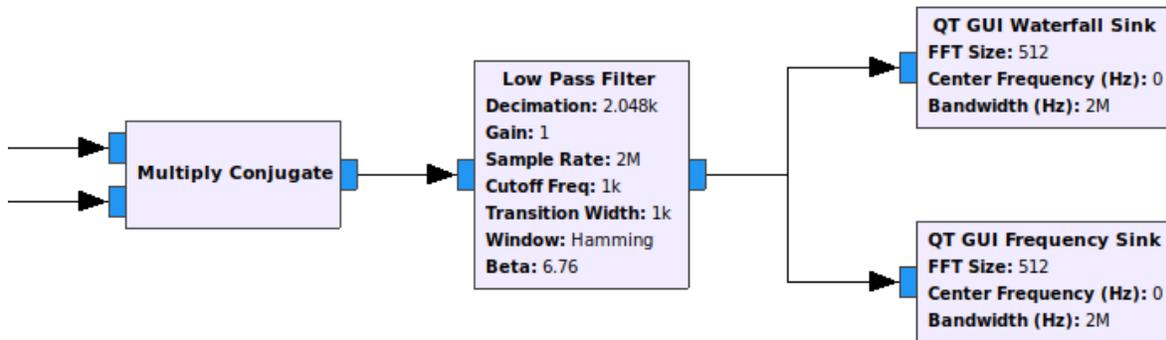
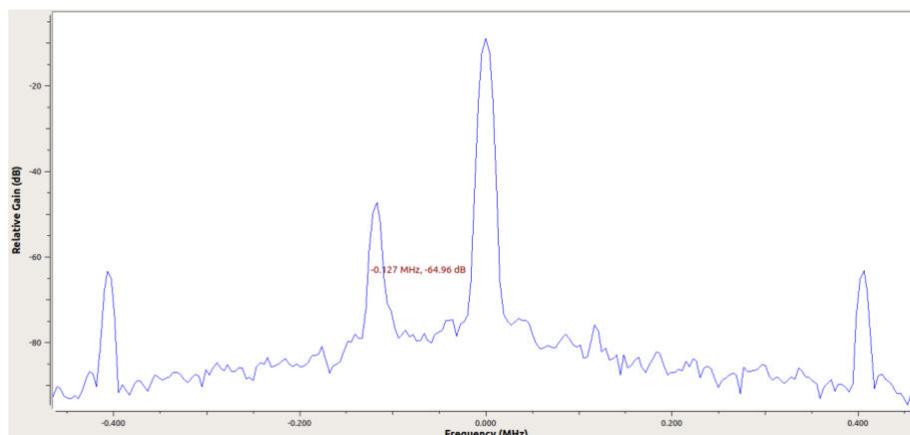


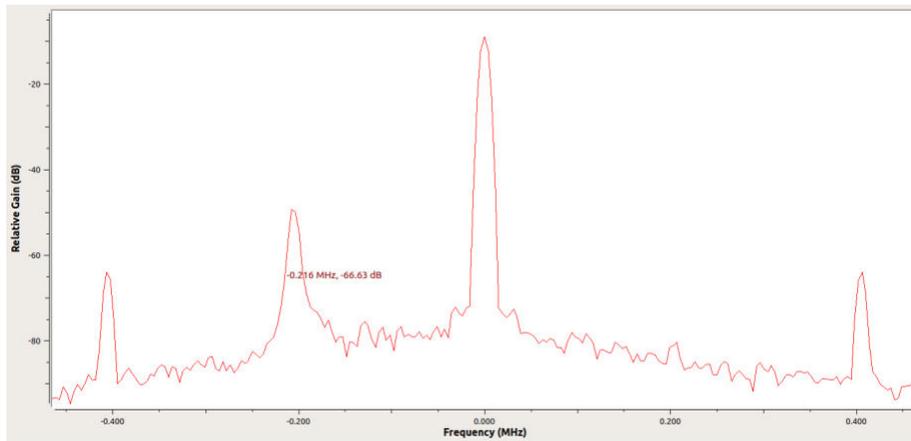
Figura 2.21. Filtrado y diezmo de la señal que contiene la variación Doppler

El plot FFT generado contiene la onda portadora transmitida en el centro y en sus extremos los componentes de frecuencia de los desplazamientos Doppler. Esta visualización en el dominio del tiempo también permite la identificación de todos los componentes de desplazamiento Doppler. Esto significa que múltiples objetivos pueden ser identificados al mismo tiempo. Sin embargo, el análisis se realiza únicamente para un objetivo.

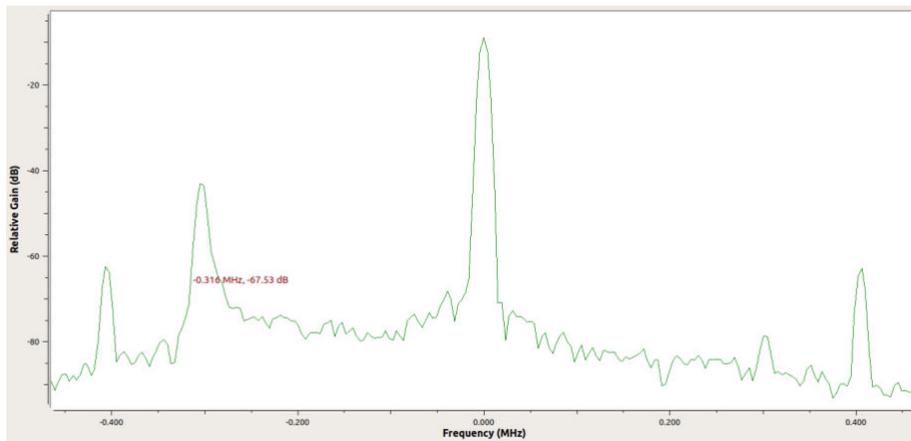
Las siguientes Figuras son las gráficas que muestra GNU Radio a través del bloque QT GUI Frequency Sink, las cuales demuestran que la frecuencia Doppler es directamente proporcional a la velocidad del objetivo (ver Video 2).



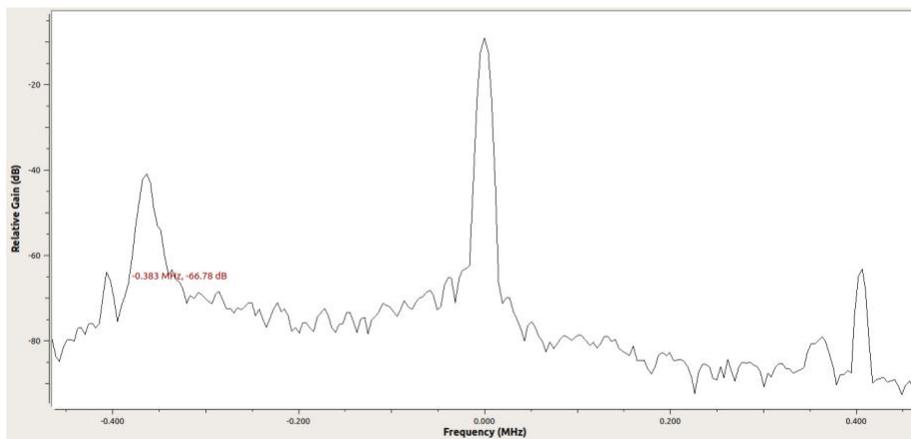
a)



b)



c)



d)

Figura 2.22. Gráficas de señales beat obtenidas en las cuales se puede evidenciar el efecto Doppler a distintas velocidades conocidas. a) 20 Km/h, b) 40 Km/h, c) 60 Km/h y d) 80 Km/h.

2.1.3.4. Almacenamiento de datos

GNU Radio también ofrece la posibilidad de almacenar datos en cualquier punto del diagrama de flujo en un archivo binario utilizando el bloque “File Sink”, mientras que el bloque “File Source” permite hacer uso de archivos pre grabados con el bloque File Sink o cualquier otro archivo. Estos bloques se pueden utilizar en combinación con cualquier otro bloque en la librería de GNU Radio. Los archivos resultantes se pueden leer una vez finalizada la ejecución del diagrama de flujo.



Figura 2.23. Bloques File Source y File Sink de GNU Radio

El bloque File Sink usa la librería stdio para guardar muestras en bruto en un archivo. Por default, mientras se realiza este proceso, un cierto número de muestras es almacenado antes de guardarlas en el archivo. Este número de muestras varía dependiendo del sistema operativo. En el caso de que exista una cantidad de datos muy pequeña es posible que el archivo quede vacío después de detener la ejecución del diagrama de flujo. De ser este el caso, se puede utilizar la opción Unbuffered. Esta opción permite omitir la operación de almacenamiento en buffer y escribe las muestras directamente en el archivo sin tener en cuenta un mínimo de datos.

GNU Radio utiliza rutas de archivos absolutas. Por lo tanto, es necesario cambiar la ruta de almacenamiento cada vez que se ejecute el diagrama para que estos no se sobrescriban, esto se puede lograr simplemente cambiándole el nombre al archivo cada vez que se requiera guardar nueva información, es decir cada que se ejecute el programa.

En GNU Radio los datos pueden representarse de varias formas. El tipo de datos se puede seleccionar en el bloque “File Sink” y debe coincidir con el tipo de datos de las muestras que se transmiten a este. Los tipos de datos utilizados son:

- complex64: IEEE 754 single-precision floats, 4 bytes/muestra, real e imaginario (I, Q)
- float32: IEEE 754 single-precision floats, 4 bytes/muestra
- int32: signed integer, 4 bytes/muestra

- int16: signed integer, 2 bytes/muestra
- int8: signed integer, 1 bytes/muestra

Cualquier información grabada utilizando el bloque “File Sink” generará un archivo cuyo formato será diferente dependiendo del tipo de variable [20].

Los modelos en GNU Radio con la ubicación del bloque File Sink para almacenar la información se muestran en las siguientes secciones.

2.1.3.5. Análisis y procesamiento de las señales en Matlab

Para analizar de manera más precisa las señales obtenidas de las pruebas de nuestro modelo de radar CW realizadas utilizando GNU Radio y el dispositivo plutoSDR se decidió utilizar la plataforma de Matlab.

En Matlab existen funciones que permiten la lectura de los archivos generados en GNU radio, cada tipo de datos usados en GNU Radio requieren una función específica para poder ser leídos. Estas funciones están disponibles para ser descargadas en el repositorio de GitHub en el siguiente enlace [21], y algunas de ellas son las siguientes:

- read_complex_binary.m
- read_float_binary.m
- read_int_binary.m

Como se mencionó anteriormente la función que se debe escoger, de entre todas las existentes en el repositorio de GitHub, para poder leer el archivo depende del tipo de datos con el que este fue grabado al ejecutar el programa de GNU Radio. En nuestro caso, debido a que el único tipo de datos que recibe el dispositivo PlutoSDR son complejos, todo el programa de GNU Radio se diseñó para mantener este mismo tipo de datos. Por lo tanto, la función de Matlab que debemos escoger es “read_complex_binary.m”. El uso de esta función es igual a la de cualquier otra función en MatLab, teniendo como único parámetro de entrada el nombre del archivo que se desea leer. A continuación, se muestra la manera de utilizar la función requerida y el código de la función.

Para leer el archivo en MatLab se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Copiar el archivo generado por GNU Radio y la función adecuada para la lectura del tipo de datos en alguna ubicación del Current Folder de MatLab.

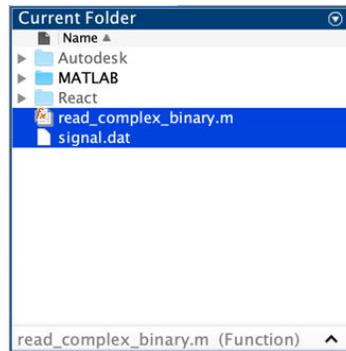


Figura 2.24. Función de lectura y señal a analizar

2. Para poder utilizar la señal generada en GNU Radio es necesario agregar esa información a una variable, utilizando el siguiente comando.

$$signal = read_complex_binary('signal.dat');$$

3. Una vez asignada la información del archivo signal.dat generado en GNU Radio a una variable en MatLab, esta variable se puede utilizar como cualquier otra variable de MatLab para su procesamiento y análisis.

⌘

```
function v = read_complex_binary (filename, count)

% us0: read_complex_binary (filename, [count])
%
% abre el archive y regresa su contenido en un vector columna,
% tratandolo como números complejos de 32 bits
%
m = narginchk (1,2,nargin);
if (m)
    usage (m);
end

if (nargin < 2)
    count = Inf;
end

f = fopen (filename, 'rb');
if (f < 0)
    v = 0;
else
    t = fread (f, [2, count], 'float');
    fclose (f);
    v = t(1,:) + t(2,:)*1i;
    [r, c] = size (v);
    v = reshape (v, c, r);
end
```

⌘

Para graficar las funciones en tiempo únicamente es necesario utilizar el comando *plot()* con su argumento de entrada el nombre de la variable en donde se guardó la señal. Para poder observar de mejor manera el fenómeno del efecto Doppler se amplía la imagen con las herramientas del visor de imágenes de MatLab en la parte deseada.

Para determinar las componentes de frecuencia correspondientes a las diferentes velocidades de los experimentos realizados, es necesario calcular la FFT de la señal beat. Para ello se utilizó el siguiente script de Matlab.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Señal en Frecuencia %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc, clear all, close all

% La frecuencia de la señal es 1 kHz
Fs = 2e6;
Ts = 1/Fs;

S = real(read_complex_binary('fdSac20.dat'));
%plot(S) % Muestra la señal en tiempo

t = 0:Ts:0.01;

AA = floor(length(S)/length(t));
signal = S(1:length(t)*AA);
x = signal(1:length(t)); % Fragmento de la señal

%DOMINIO DE LA FRECUENCIA
%y=FFT(Xn,nFFT)-----> 2^n radix2
L = length(x);
nFFT=16; % desde 2
while nFFT<L
    nFFT=nFFT*128;
end

Y = fft(x,nFFT); % Complejos
f=linspace(0,Fs,nFFT);
plot(f,abs(Y))

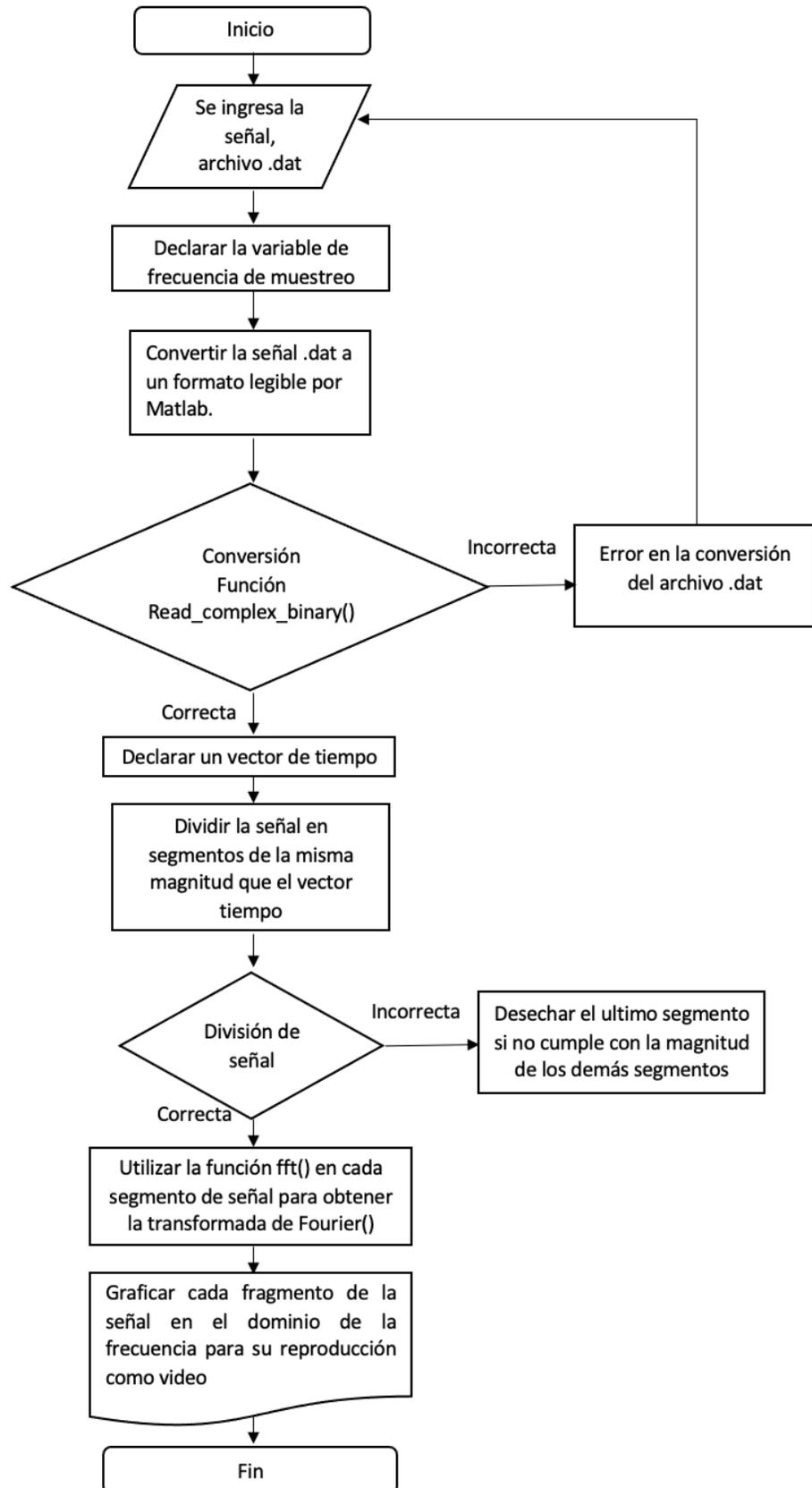
aux=1;
while(aux < AA)
    x = signal(aux*L+1:(aux+1)*L);
    Y = fft(x,nFFT); % Complejos

    plot(f,abs(Y))
    %xlim([-20e3 2.02e6])
    xlim([0 2e3])
    drawnow

    aux = aux+1;
end

```

En el siguiente diagrama de flujo del script anterior se muestra el tratamiento de la señal obtenida en GNU Radio.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los resultados obtenidos en la sección de transmisión la frecuencia del oscilador local (frecuencia portadora) del transceiver se configura a 5.5 GHz, valor que tiene que ser coherente con el rango de funcionamiento del dispositivo PlutoSDR y antenas Altelix utilizadas. Con el fin de obtener el máximo alcance tanto el transmisor como el receptor se configuraron con valores mínimos de atenuación y máximos de ganancia. Algunos parámetros como la tasa de muestreo y frecuencia de portadora tienen que coincidir al momento de configurar el transmisor y el receptor, los detalles de su configuración se especificaron en la sección 2.1.3

El proceso de transmisión y recepción se resume en la Figura 3.1.

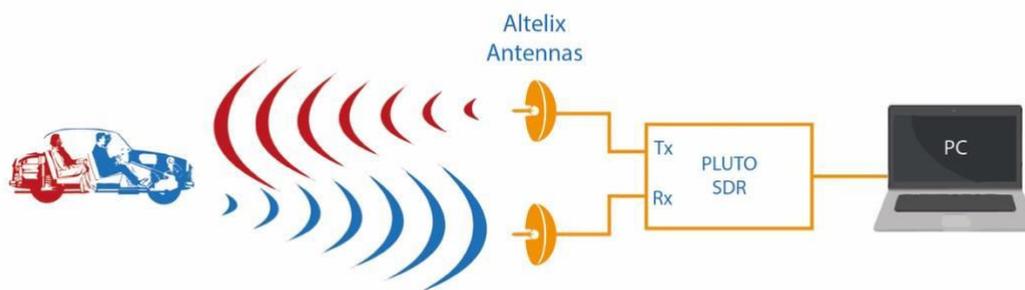


Figura 3.1. Operación del radar Doppler CW

3.1 COMPROBACIÓN DE LA PRESENCIA DEL EFECTO DOPPLER EN LAS ONDAS REFLEJADAS

Las pruebas se realizaron a diferentes velocidades fijas como: 20, 40 y 60 Km/h; el objetivo de esta prueba es el de observar la variación de frecuencia de la señal recibida para poder comprobar la presencia del efecto Doppler en la señal reflejada, resultado que si se logró evidenciar como se esperaba.

También se esperaba entender como se afecta la frecuencia de portadora a la que se configuraron los dispositivos SDR, para lo cual se envió una señal coseno a 1 kHz con el bloque "Signal Source" (ver Figura 3.2). En cada caso se grabaron los datos respectivos a las diferentes velocidades antes descritas.

Los bloques File Sink captan tanto la señal transmitida como la recibida. La visualización en tiempo real de la señal recibida es posible gracias al bloque "Low Pass Filter" que también realiza una función de decimación para poder observar la señal. El bloque que

muestra la gráfica de los datos de la señal de recepción es el bloque “QT GUI Frequency Sink”, para disminuir la carga de procesamiento de datos el tamaño de la FFT se configuró a 512, lo que evita que las mediciones de las frecuencias en los diferentes escenarios sean precisas.

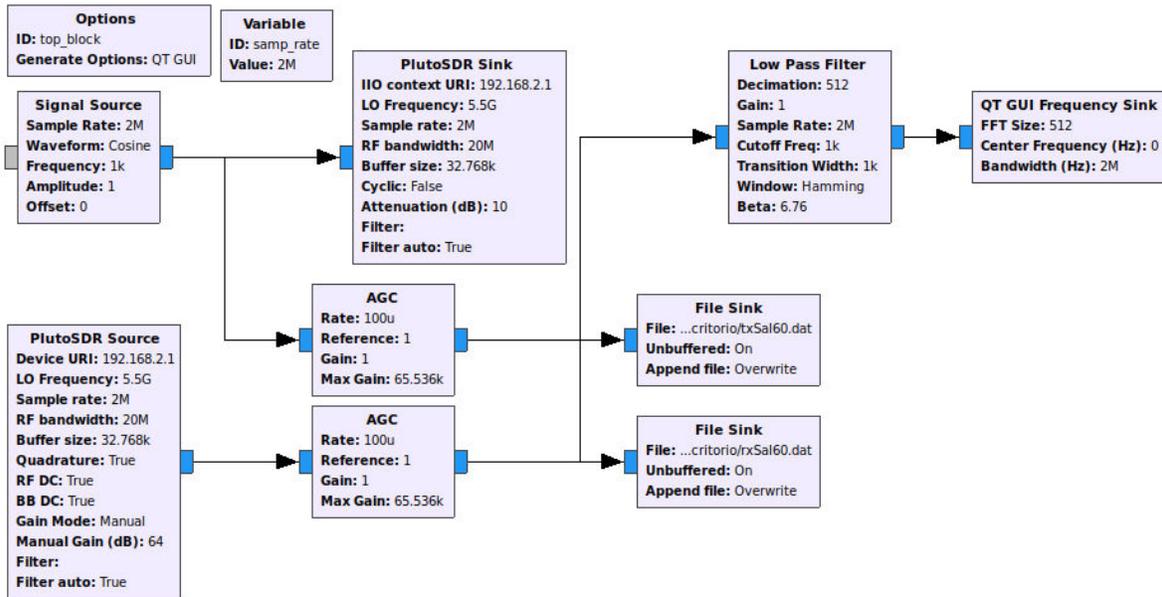


Figura 3.2. Transmisión de una señal coseno de 1 kHz.

3.1.1 SEÑAL COSENO TRANSMITIDA

El resultado esperado sería una variación de frecuencia alrededor de 1 kHz, proporcional a la velocidad del objetivo, esta variación sería positiva o negativa dependiendo de si el objetivo se acerca o se aleja.

3.1.1.1 Valores teóricos

Los valores teóricos de la variación de frecuencia calculados con la ecuación (1.8) anteriormente descrita.

- Frecuencia de Tx PlutoSDR = 5.5×10^9 Hz
- Velocidad de la luz = 3×10^8 m/s
- Velocidad del vehículo = 20, 40, 60 Km/h
- $\phi \approx 5^\circ$

$$\Delta f = f_s - f_{rx} = \frac{2f_s}{c} * v \cos(\phi) = f_d$$

Tabla 3.1. Valores teóricos de la variación Doppler

	Acercándose	Alejándose
20 km/h	202.928 Hz	- 202.928 Hz
40 km/h	405.857 Hz	- 405.857 Hz
60 km/h	608.785 Hz	- 608.785 Hz

3.1.1.2 Valores experimentales

Las señales reflejadas por el objetivo en movimiento se grabaron en diferentes archivos cada uno de los cuales hace referencia a un solo escenario por ejemplo si se aleja a 40 km/h. El bloque que almacenó estos datos es el bloque “File Sink” conectado a la salida del receptor “PlutoSDR Source” (ver Video 3).

Los resultados experimentales cuando el objetivo se acerca al radar son los siguientes:

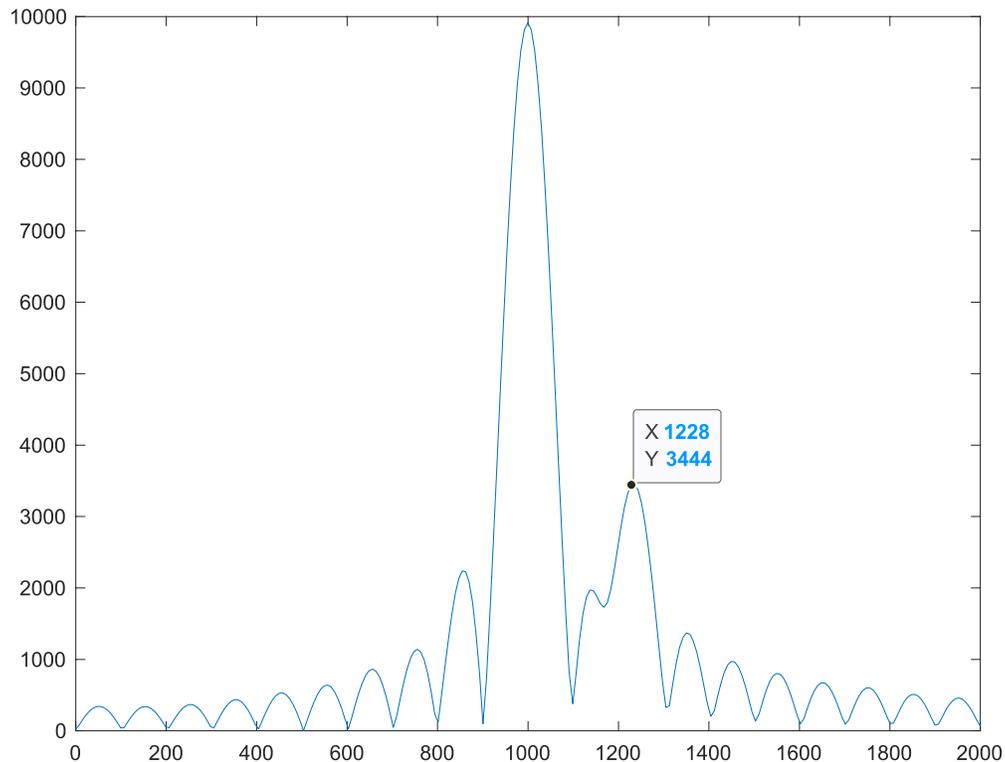


Figura 3.3. Señal reflejada por el objetivo acercándose a 20 km/h

$$\Delta f = 1228 - 1000 = 228 \text{ Hz}$$

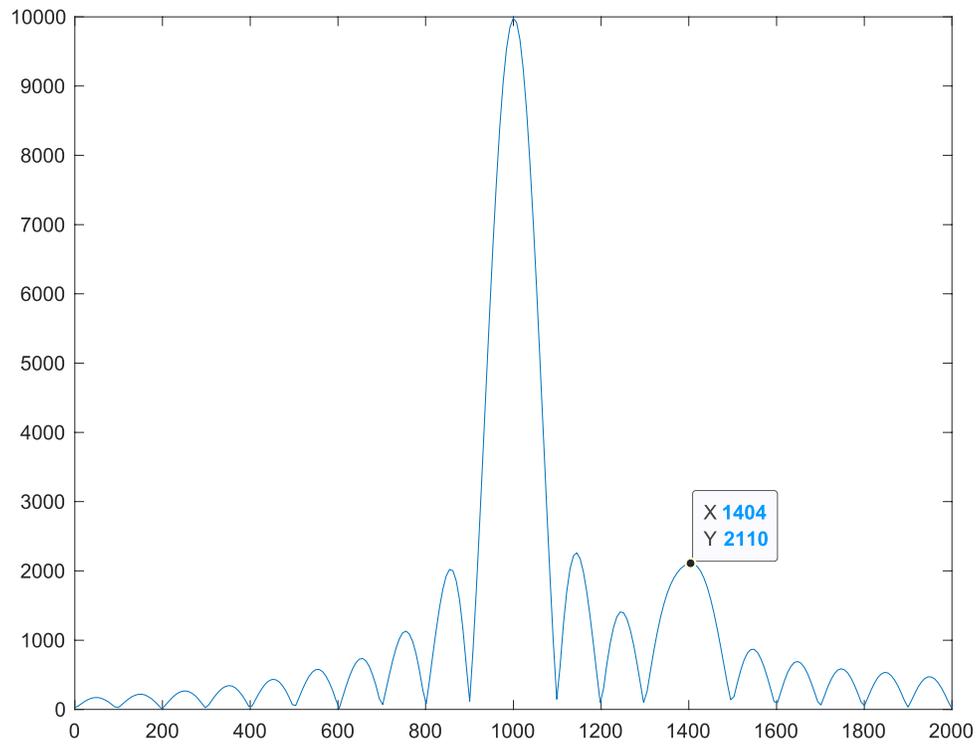


Figura 3.4. Señal reflejada por el objetivo acercándose a 40 km/h

$$\Delta f = 1404 - 1000 = 404 \text{ Hz}$$

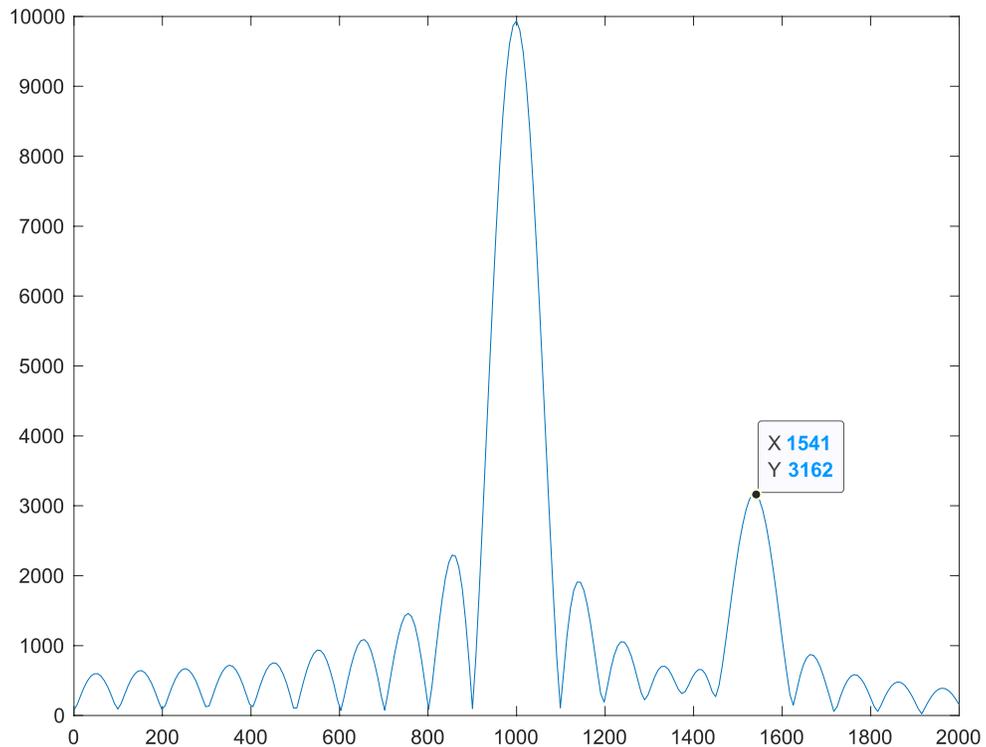


Figura 3.5. Señal reflejada por el objetivo acercándose a 60 km/h

$$\Delta f = 1541 - 1000 = 541 \text{ Hz}$$

Tabla 3.2. Valores teóricos y experimentales de la variación Doppler cuando el objetivo se acerca al radar

	Teórico	Experimental
20 km/h	202.928 Hz	228 Hz
40 km/h	405.857 Hz	404 Hz
60 km/h	608.785 Hz	541 Hz

Los resultados experimentales cuando el objetivo se aleja del radar son los siguientes:

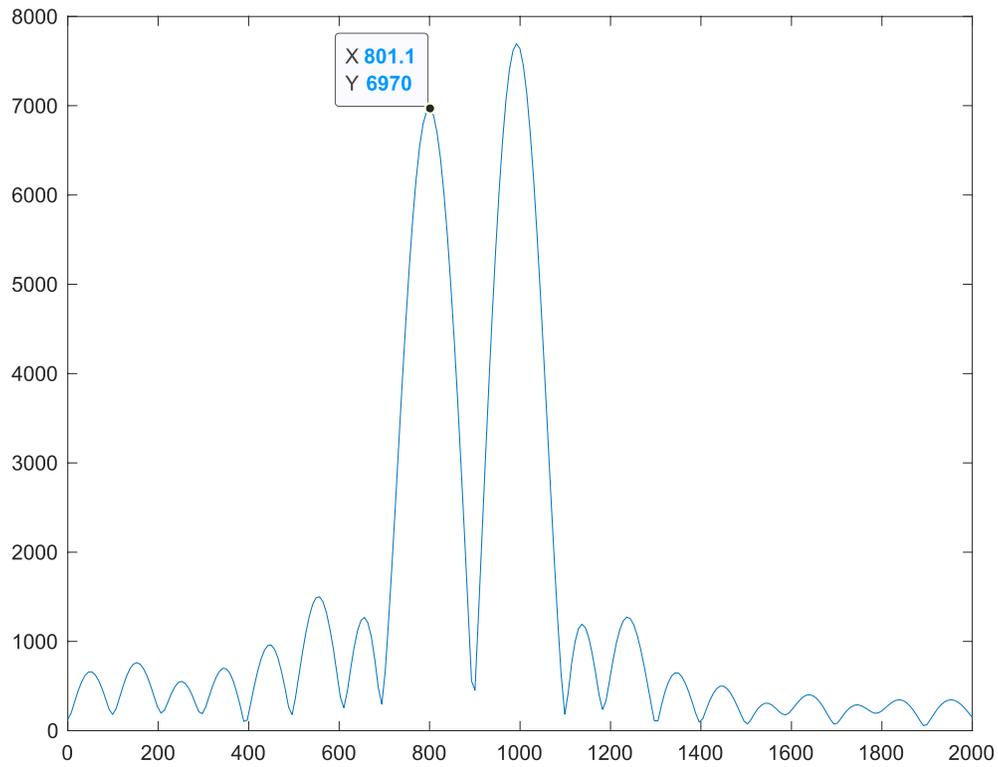


Figura 3.6. Señal reflejada por el objetivo alejándose a 20 km/h

$$\Delta f = 801.1 - 1000 = -198.9 \text{ Hz}$$

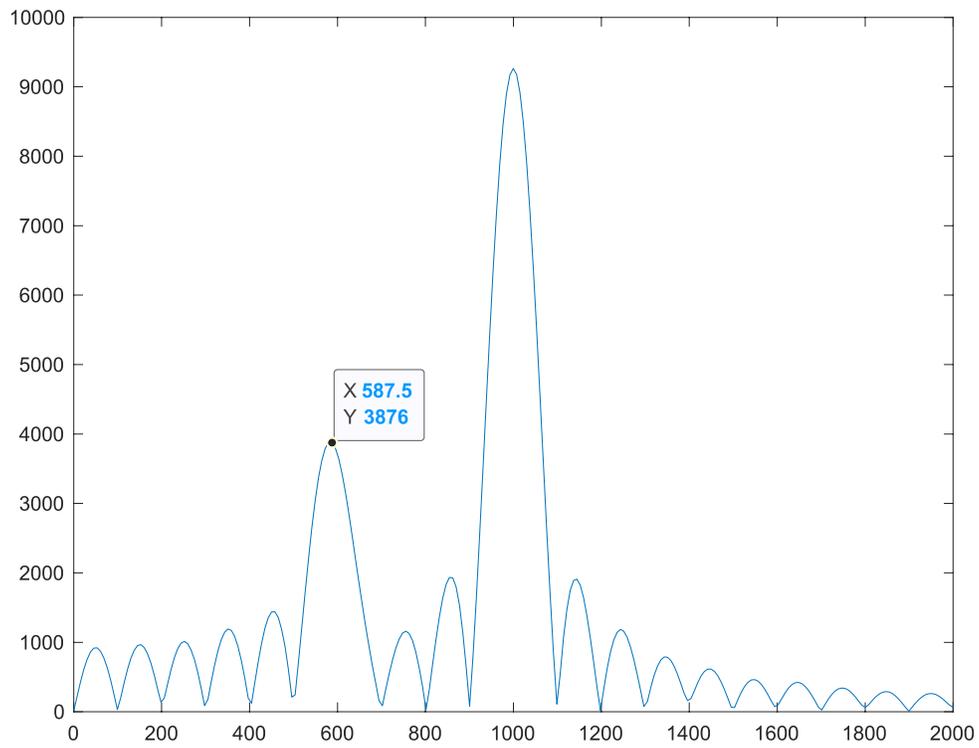


Figura 3.7. Señal reflejada por el objetivo alejándose a 40 km/h

$$\Delta f = 587.5 - 1000 = -412.5 \text{ Hz}$$

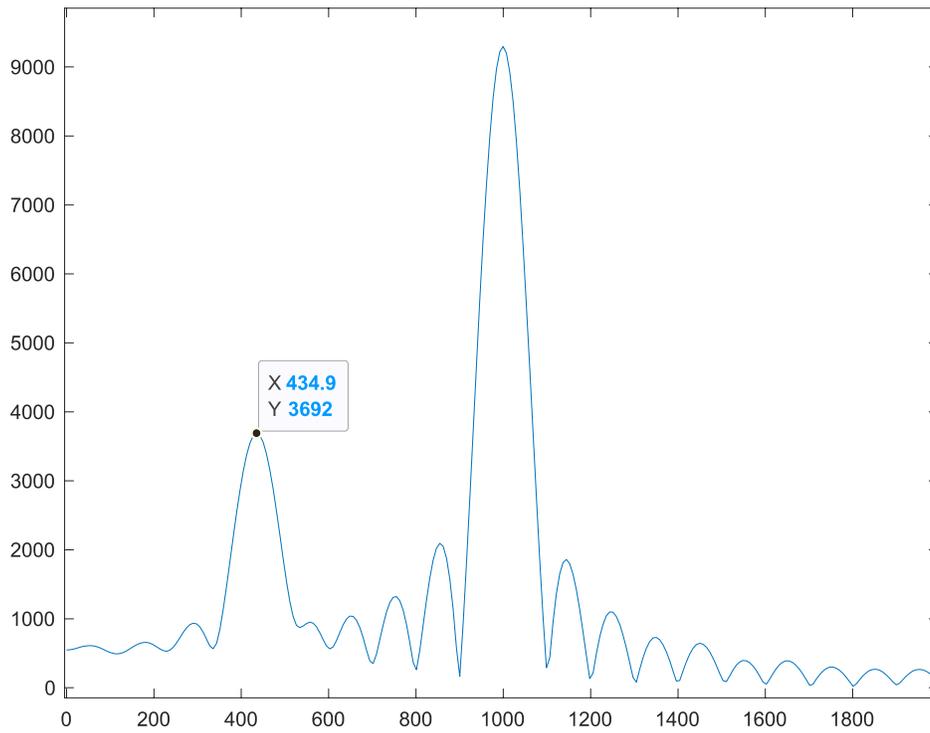


Figura 3.8. Señal reflejada por el objetivo alejándose a 60 km/h

$$\Delta f = 434.9 - 1000 = -565.1 \text{ Hz}$$

Tabla 3.3. Valores teóricos y experimentales de la variación Doppler cuando el objetivo se aleja del radar

	Teórico	Experimental
20 km/h	- 202.928 Hz	- 198.9 Hz
40 km/h	- 405.857 Hz	- 412.5 Hz
60 km/h	- 608.785 Hz	- 565.1 Hz

Cálculo del Error

$$\%E_R = \frac{|V_T - V_E|}{V_T} \times 100$$

Tabla 3.4. Errores relativos de los diferentes experimentos

	Acercándose	Alejándose
20 km/h	12.36	1.98
40 km/h	0.46	1.64
60 km/h	11.13	7.18

3.2 CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DOPPLER

Una vez que se verificó la presencia del efecto Doppler, el sistema de radar que mide la variación Doppler se configura como en la Figura 3.9.

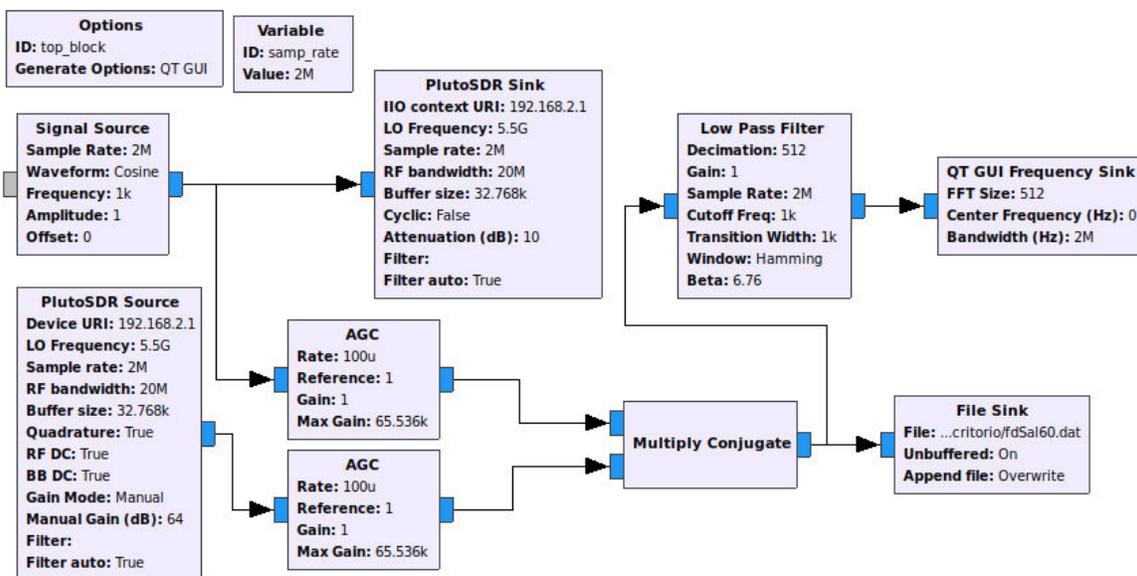


Figura 3.9. Sistema de Radar Doppler CW

En nuestro modelo de radar Doppler CW, el front-end analógico constituido por dos antenas Altelix ad5g23m2-2pk son las responsables de transmitir la señal generada y recibir la onda reflejada por el objetivo en movimiento. El plato parabólico que recubre la antena provee una protección del ruido RF y la filtración de la señal del transmisor al receptor, característica que para nuestro modelo resulta muy conveniente debido a que las antenas de transmisión y recepción se encuentran juntas.

Las señales son transmitidas y recibidas por el software GNU Radio a través de una conexión USB entre el dispositivo PlutoSDR y el computador. El Adalm-Pluto puede transmitir y recibir señales de manera simultánea a una frecuencia escogida y con un ancho de banda sintonizable, cuyos valores dependen del tipo de transceiver que haya sido configurado en el dispositivo SDR. Para que los rangos de frecuencia en los que funcionan tanto las antenas como el dispositivo PlutoSDR coincidan, este último debe ser configurado con el transceiver AD9364.

Finalmente, la señal beat se obtiene a la salida del bloque Multiply Conjugate y mediante el bloque File Sink se exporta como un archivo .dat para un análisis en tiempo diferido en el Software Matlab. Un periodograma (módulo FFT) de la señal beat se utiliza para mostrar la variación Doppler. La configuración final del hardware se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Implementación del hardware del Radar Doppler CW

Para la obtención de la velocidad se realizaron dos experimentos a velocidades de 20, 40, y 60 km/H, cada velocidad a tres diferentes ángulos de apuntamiento de las antenas a 0, 30 y 45 grados (ver Figura 3.11.) tomando como eje la dirección de movimiento del vehículo para su ubicación. El ángulo de cero grados se lo obtuvo de manera aproximada apuntando la antena en la misma dirección que el camino. Por lo tanto, las ondas viajarán paralelamente al camino, sin embargo, la dirección de movimiento del vehículo si tendrá un cierto ángulo con respecto a la propagación de las ondas debido al ancho del lóbulo de propagación de las antenas.

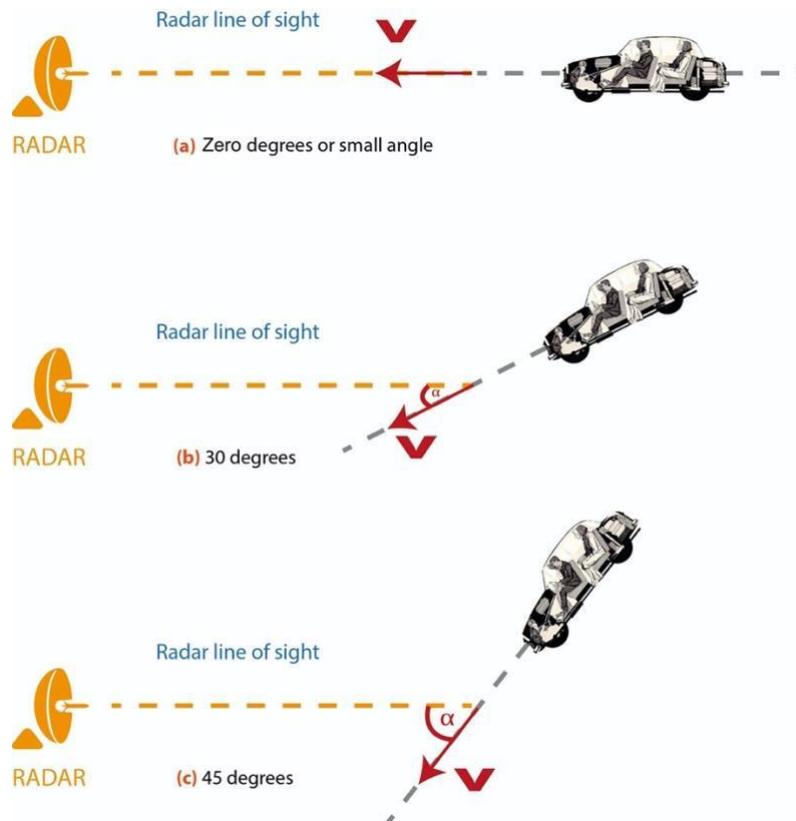


Figura 3.11. Representación de los ángulos de apuntamiento del radar a 0, 30 y 45 grados

El primer experimento considera al vehículo moviéndose hacia el radar, mientras que el segundo experimento se lo realiza con el vehículo alejándose del radar. Tanto GNU Radio como Matlab son utilizados para visualización y procesamiento de la señal respectivamente (ver Video 4).

Las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 muestran el periodograma de tres señales beat correspondientes a las diferentes velocidades, cada figura con un ángulo de apuntamiento de la antena diferente y considerando que el vehículo se acerca hacia el radar.

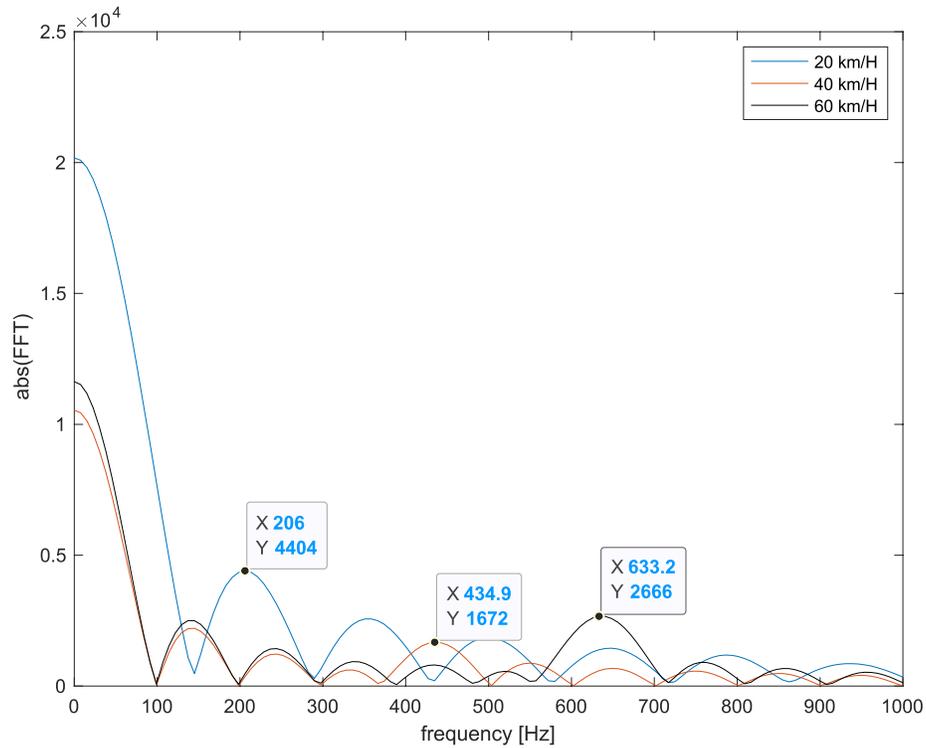


Figura 3.12. Periodograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 0 grados

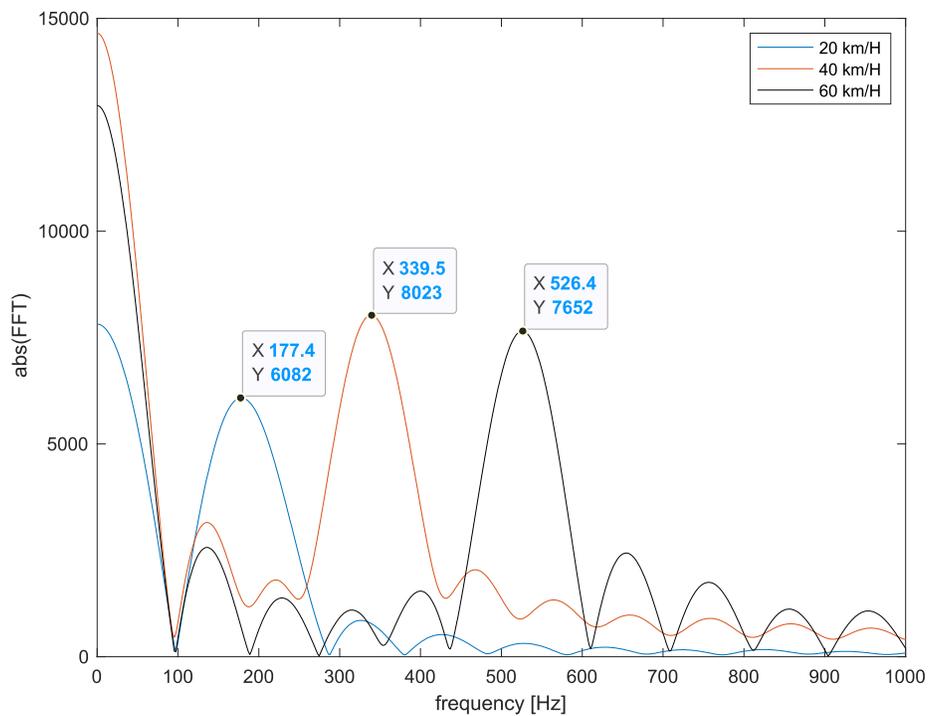


Figura 3.13. Periodograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 30 grados

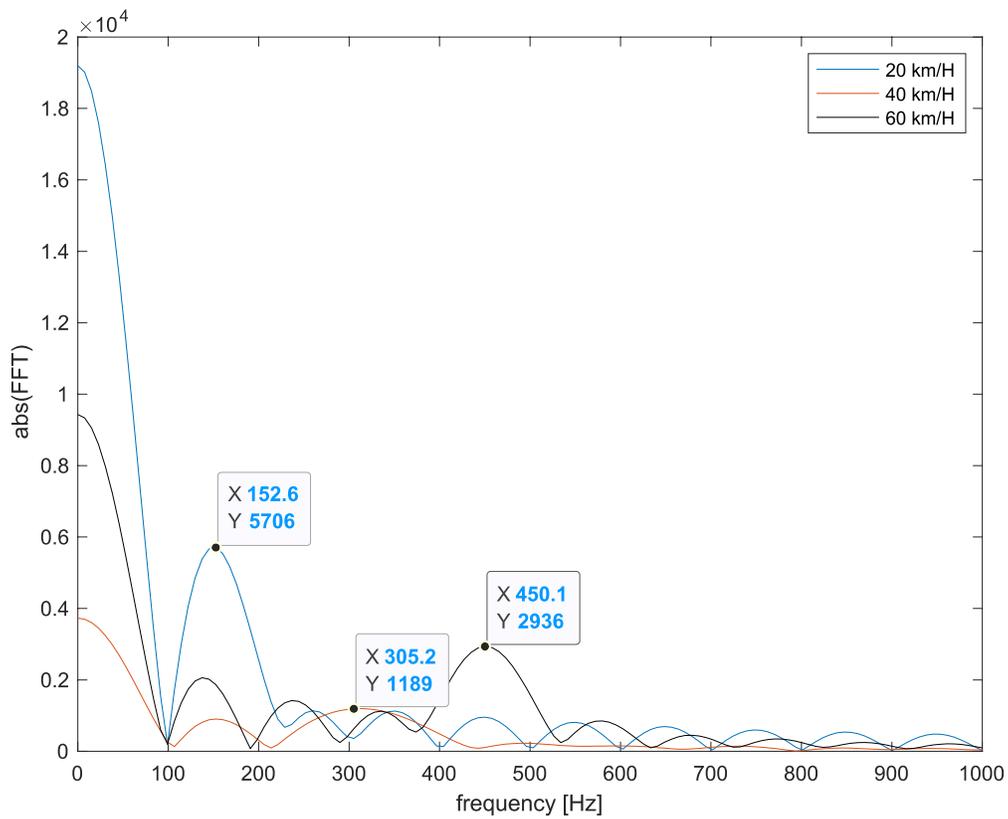


Figura 3.14. Peridograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 45 grados

Las Figuras 3.15, 3.16 y 3.17 muestran el periodograma de tres señales beat correspondientes a las diferentes velocidades, cada figura con un ángulo de apuntamiento de la antena diferente y considerando que el vehículo se aleja del radar.

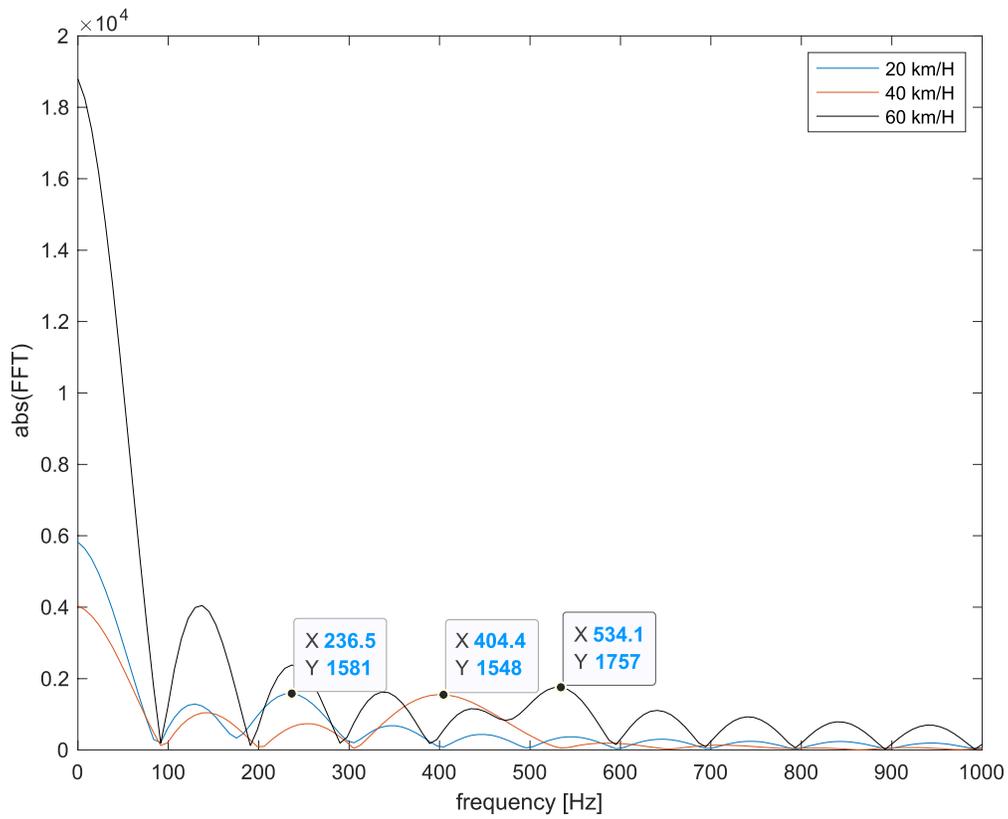


Figura 3.15. Peridograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 0 grados

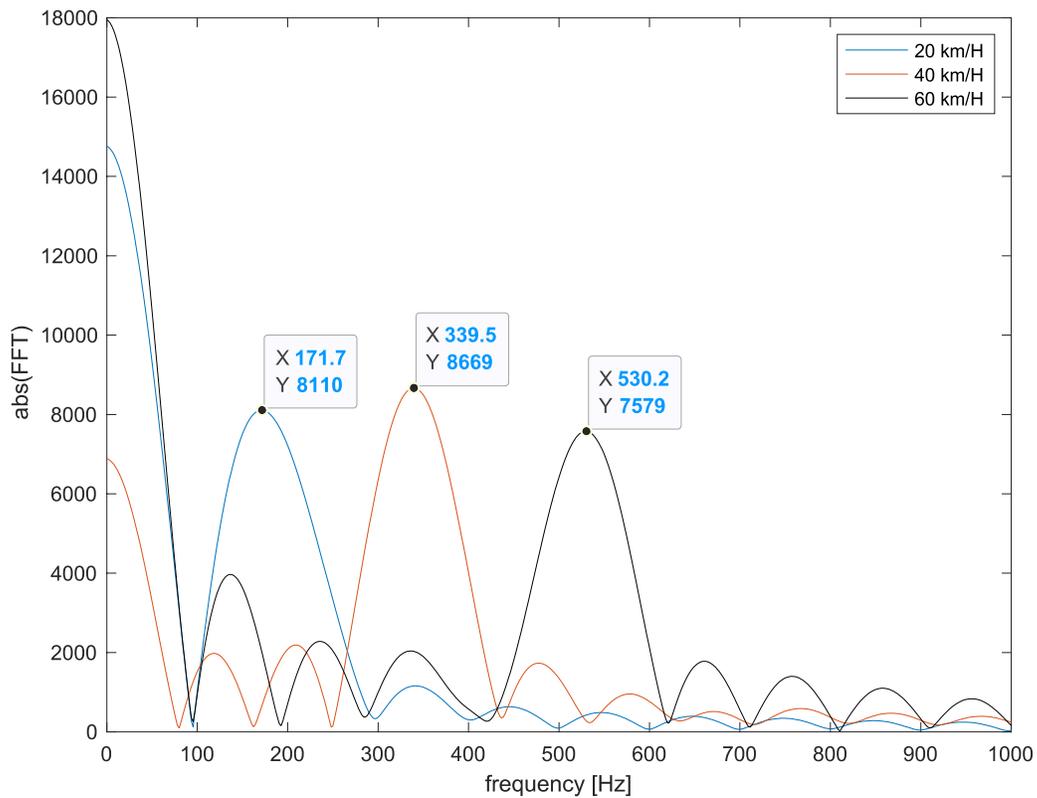


Figura 3.16. Peridograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 30 grados

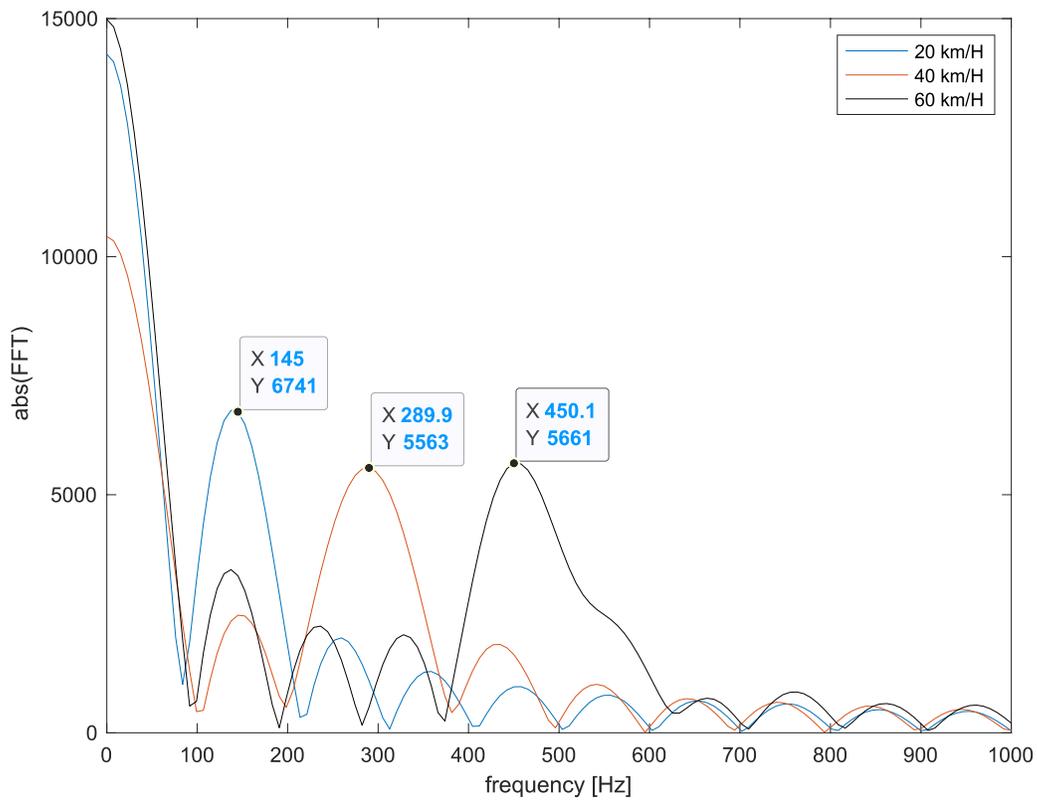


Figura 3.17. Peridograma de la señal beat con un ángulo de apuntamiento de 45 grados

En la Tabla 3.5 se muestran los valores teóricos de la variación Doppler calculados con la ecuación (1.8) y los parámetros de la sección 3.1.1.1.

Tabla 3.5. Valores teóricos de la variación Doppler

	0°	30°	45°
20 km/H	203.703 Hz	176.413 Hz	144.04 Hz
40 km/H	407.407 Hz	352.82 Hz	288.08 Hz
60 km/H	611.611 Hz	529.273 Hz	432.12 Hz

Los valores recolectados en las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.6. y 3.7. para los dos experimentos respectivamente.

Tabla 3.6. Variación Doppler cuando el objetivo se acerca al radar

	0°	30°	45°
20 km/H	206 Hz	177.4 Hz	152.6 Hz
40 km/H	434.9 Hz	339.5 Hz	305.2 Hz
60 km/H	633.2 Hz	526.4 Hz	450.1 Hz

Tabla 3.7. Variación Doppler cuando el objetivo se aleja del radar

	0°	30°	45°
20 km/H	236.5 Hz	171.7 Hz	145 Hz
40 km/H	404.4 Hz	339.5 Hz	289.9 Hz
60 km/H	534.1 Hz	530.2 Hz	450.1 Hz

Para poder contrastar los valores teóricos con los experimentales las Tablas 3.8. y 3.9. contienen los calculos del error relativo para cada experimento realizado, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%E_R = \frac{|V_T - V_E|}{V_T} \times 100$$

Tabla 3.8. Error relativo cuando el bjetivo se cerca al radar

	0°	30°	45°
20 km/H	1.1276	0.5595	5.9428
40 km/H	6.7483	3.7753	5.9428
60 km/H	3.5299	0.5361	4.1609

Tabla 3.9. Error relativo cuando el bjetivo se aleja del radar

	0°	30°	45°
20 km/H	16.1004	2.6716	0.6665
40 km/H	0.7381	3.7753	0.6318
60 km/H	12.6733	0.1820	4.1609

Debido a que las señales de las diferentes velocidades se toman con diferentes ángulos de inclinación de las antenas, el alcance máximo del radar no es necesario dentro del cálculo de la velocidad utilizando la frecuencia Doppler.

Los valores de frecuencia Doppler utilizados para el cálculo de la velocidad son los que presenten una amplitud máxima, es decir, cuando el vehículo pasa cerca de las antenas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

De las Figuras de la sección 3.2 se puede concluir que la amplitud de la señal beat se incrementa con el ángulo de apuntamiento, por lo que las mediciones se pueden visualizar de manera más precisas con los ángulos de 30 y 45 grados.

Asumiendo que el valor de la velocidad del vehículo mostrado en el tacómetro es exacto y corresponde a la velocidad con la que está viajando el vehículo al pasar justo en frente de la antena de recepción, las medidas experimentales comparadas con los valores teóricos obtuvieron un margen de error entre 0.182% al 16.1%

La frecuencia de la señal transmitida determinará la velocidad máxima que puede detectar el modelo de radar Doppler CW. La variación Doppler puede ocurrir tanto al lado derecho como izquierdo dependiendo de si el vehículo se acerca o se aleja, por lo que la máxima velocidad detectable corresponderá al rango de frecuencias desde el origen hasta la frecuencia de la onda transmitida.

Debido a la frecuencia de 5.5 GHz que estamos utilizando, la longitud de onda que tiene nuestra señal es de 5.4545 *cm*. Esto significa que cualquier objetivo mayor a este tamaño podrá ser detectado.

De las pruebas realizadas en los tres escenarios se concluye que la variación Doppler es directamente proporcional a la velocidad del vehículo, lo cual se puede evidenciar tanto en la señal recibida pura, como en la señal beat obtenida de la multiplicación de la señal transmitida y recibida.

4.2. RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta los resultados obtenidos tanto de la señal reflejada pura como de la señal que contiene la variación Doppler, se recomienda que el ángulo de apuntamiento de la antena sea mayor de 30 grados con respecto a la dirección de movimiento del vehículo ya que con esta configuración los datos recolectados presentaron un error mínimo, casi despreciable.

Además, se recomienda desarrollar un modelo que funcione en tiempo real para poder observar y comparar las mediciones en el momento de realizar los experimentos. Este modelo en tiempo real se podría desarrollar puramente en GNU Radio o en Matlab, siendo este último el más efectivo para el procesamiento de las señales recibidas por el dispositivo SDR y también el que requiere una configuración más precisa de todos los parámetros del dispositivo SDR.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. R. p. I. A. d. I. O. M. d. I. Salud, «Organización Panamericana de la Salud», 04 Junio 2019. [En línea]. Available: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=15237:status-of-road-safety-in-the-region-of-the-americas-2019&Itemid=39873&lang=es.
- [2] C. d. T. d. Ecuador, «CONTROL DE VELOCIDAD A TRAVÉS DE RADARES MÓVILES,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://www.comisiontransito.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/control_radares.pdf.
- [3] M. I. Skolnik, «Introduction to Radar Systems,» 1981. [En línea]. Available: <https://deebak.files.wordpress.com/2009/05/skolnik.pdf>.
- [4] C. F. Aldaz Corrales, «Estudio de la tecnología SDR (Software Defined Radio) y posibles aplicaciones en comunicaciones inalámbricas, Bibdigital,» Febrero 2009. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1339>.
- [5] travisfcollins, «Analog Devices, Inc.,» 20 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms2-ebz/ad9361>.
- [6] A. LLC, «Altelix Connectivity Evolved,» 27 Junio 2018. [En línea]. Available: https://docs.altelix.com/datasheets/DS_AD5G23M2.pdf.
- [7] P. Bassem R. Mahafza, «Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB,» 2000. [En línea]. Available: http://dsp-book.narod.ru/RSAD/C1828_PDF_TOC.pdf.
- [8] J. A. S. W. A. H. Mark A. Richards, Principles of Modern Radar, Vol. I: Basic Principles, Chelsea, MI: Scitech Publishing, 2010.
- [9] M. I. Skolnik, Radar Handbook, New York: McGraw Hill Companies, 2008.
- [10] J. A. S. William L. Melvin, Principles of Modern Radar, Vol. III: Radar Applications, Scitech Publishing, 2014.
- [11] E. J. Barlow, "Doppler Radar," in *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 4, pp. 340-355, April 1949, doi: 10.1109/JRPROC.1949.231638.
- [12] C. Villien, V. Fleck, E. Ostertag and P. Raymond, "3-D short-range localization device by low-cost CW-Doppler radar," *IEEE International Radar Conference, 2005.*, Arlington, VA, 2005, pp. 557-561, doi: 10.1109/RADAR.2005.1435888.
- [13] S. C. K. Herath, C. V. D. Nagahawatte and P. N. Pathirana, "Tracking multiple mobile agents with single frequency Continuous Wave radar," *2009 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Melbourne, VIC, 2009, pp. 163-167, doi: 10.1109/ISSNIP.2009.5416762.
- [14] T. W. Mathumo, T. G. Swart and R. W. Focke, "Implementation of a GNU radio and python FMCW radar toolkit," 2017 IEEE AFRICON, Cape Town, 2017, pp. 585-590, doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095547.

- [15] L. Freitas, «Software Radar,» 2018. [En línea]. Available: <https://github.com/luigifcruz/software-radar>.
- [16] I. Analog Devices, «Customizing the Pluto configuration», 22 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/customizing>.
- [17] S. Aulia, A. B. Suksmono and A. Munir, "Stationary and moving targets detection on FMCW radar using GNU radio-based software defined radio," *2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, Nusa Dua, 2015, pp. 468-473, doi: 10.1109/ISPACS.2015.7432817.
- [18] Sundaresan S, Anjana C, T. Zacharia and Gandhiraj R, "Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP," *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, 2015, pp. 1530-1534, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322772.
- [19] I. Analog Devices, «Basic internals of Pluto,» 10 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/understanding>.
- [20] A. Gannon, «GNU Radio: Tools for Offline Processing With MATLAB,» 18 Noviembre 2014. [En línea]. Available: https://adamgannon.com/2014/11/18/gnuradio_offline_pt1/.
- [21] A. Gannon, «matlab_utils,» 13 Octubre 2014. [En línea]. Available: https://github.com/adamgann/matlab_utils.

ANEXOS

ANEXO A. SDR-based Speed Measurement with Continuous-Wave Doppler Radar

ANEXO A

Ver archivo adjunto

ORDEN DE EMPASTADO