



**INTEGRACIÓN DE COMPONENTES HARDWARE Y SOFTWARE
PARA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR
RADAR LFM CW SOBRE UNA PLATAFORMA MÓVIL PARA
DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS**

GABRIEL ANTONIO GARCÍA LONDOÑO

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO, COLOMBIA
Año 2019**

**INTEGRACIÓN DE COMPONENTES HARDWARE Y SOFTWARE
PARA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR
RADAR LFMCW SOBRE UNA PLATAFORMA MÓVIL PARA
DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS**

GABRIEL ANTONIO GARCÍA LONDOÑO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director

Sebastián Puente Reyes

Ingeniero Electrónico con maestría en ciencias de la información y
comunicaciones.

Docente, programa de Ingeniería electrónica.

Codirector

Tomás Francisco Guzmán Beltrán

Ingeniero Electrónico con maestría en radar, tecnologías, equipos y diseño de
sistemas.

Ingeniero de Investigación y Desarrollo de Sensores de CODALTEC.

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO, COLOMBIA
Año 2019**

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

AUTORIZACIÓN

Yo Gabriel Antonio García Londoño mayor de edad, vecino de Villavicencio-Meta, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 1.121.931.838 de Villavicencio, actuando en nombre propio en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado “Integración de componentes hardware y software para validación del funcionamiento de un sensor radar LFM CW sobre una plataforma móvil para detección de obstáculos”, hago entrega del ejemplar y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a la **UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS**, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, con la finalidad de que se utilice y use en todas sus formas, realice la reproducción, comunicación pública, edición y distribución, en formato impreso y digital, o formato conocido o por conocer de manera total y parcial de mi trabajo de grado o tesis.

EL AUTOR – ESTUDIANTE, Como autor, manifiesto que el trabajo de grado o tesis objeto de la presente autorización, es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros; por tanto, la obra es de mi exclusiva autoría y poseo la titularidad sobre la misma; en caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, como autor, asumiré toda la responsabilidad, y saldré en defensa de los derechos aquí autorizados, para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia, se firma el presente documento en dos (2) ejemplares del mismo valor y tenor en Villavicencio - Meta, a los _____ días del mes de _____ de dos mil diecinueve (2019).

EL AUTOR – ESTUDIANTE

Firma _____
Nombre: _____
C.C. No. _____ d _____
e _____

Nota de Aceptación:

-

Ph.D. Javier Vargas Guativa
Jurado

M.Sc. Sebastián Fernando Puente Reyes
Director

Ciudad y fecha

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado principalmente a mi familia, por su incondicional apoyo durante estos cinco años de pregrado. A mi mamá Adriana Londoño y mi papá Gabriel García, gracias por ser el motor que impulsó la finalización de mis estudios académicos y por su comprensión durante este tiempo. También quiero agradecerles a mis hermanas Jessica García y Kellyn García porque son también partícipes de este logro, sin su respaldo esto no sería posible. A mi sobrino Juan Andrés por las sonrisas incondicionales y por brindarle mucha alegría al hogar. Especialmente quiero agradecer a Angie Pérez, quien creyó ciegamente en mí durante gran parte de este período, aquí se refleja todo su apoyo y amor.

También quiero agradecer a todos los profesores que tuve en la Universidad de los Llanos, gracias por brindarme parte de sus conocimientos que hoy me sirvieron fundamentalmente para la realización de mi trabajo de grado. Le agradezco al ingeniero Sebastián Puentes por sus enseñanzas y por la colaboración para con la culminación de mi trabajo de pasantía.

Agradezco profundamente a la Corporación de Alta Tecnología (CODALTEC), a todos los ingenieros del grupo de Investigación en Desarrollo de Sensores (GIDS) por su capacidad de transmitir el conocimiento necesario para el desarrollo de la pasantía, asimismo por su colaboración, paciencia y ayuda. Particularmente a los ingenieros Tomás Guzmán, Felipe Silva y Yolanda Parra por apoyarme, por el acompañamiento constante, por permitir el desarrollo del trabajo de grado en su grupo de investigación y por poner a mi disposición todos sus equipos de laboratorio y de cómputo.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	A
TABLA DE CONTENIDO.....	B
LISTA DE FIGURAS.....	D
LISTA DE TABLAS.....	F
CLÁUSULA DE CONFIDENCIALIDAD.....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
3. JUSTIFICACIÓN.....	7
4. METODOLOGIA.....	8
4.1. Etapa 1: Fundamentos teóricos de sistemas embebidos.....	8
4.2. Etapa 2: Análisis y diseño de los elementos del sistema (HW).....	8
4.3. Etapa 3: Diseño e implementación de los elementos del sistema (SW).....	8
4.4. Etapa 4: Integración y validación del dispositivo.....	8
4.5. Etapa 5: Documentación general y finalización del proyecto.....	9
5. MARCO REFERENCIAL.....	10
5.1 MARCO CONTEXTUAL.....	10
5.2. ESTADO DEL ARTE.....	11
5.3. MARCO TEÓRICO.....	16
5.3.1. Introducción a los sistemas de radar.....	16
5.3.2. Clasificación de los radares.....	17
5.3.3. Comparación de las características del radar.....	19
5.3.4. Radar FMCW.....	20
5.3.5. Radar Móvil.....	27
5.3.6. Componentes de Radiofrecuencia.....	29
5.3.7. Aspectos para tener en cuenta en la detección radar.....	32
6. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	35
6.1. HARDWARE.....	36
6.1.1. Sensor Radar transceptor K-LC6.....	37
6.1.2. STEMLab Red Pitaya.....	41
6.1.3. Diseño del circuito de acondicionamiento de las señales.....	42
6.1.4. Interfaz de comunicaciones.....	51
6.1.5. Sistema de visualización de distancia.....	52
6.1.6. Fuente de alimentación.....	52
6.1.7. Diseño del PCB.....	53
6.2. SOFTWARE.....	55
6.2.1 Software de generación de señal de transmisión.....	57

6.2.2	Software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB.....	59
6.3.	PLATAFORMA MÓVIL.....	65
6.3.1.	Plataforma Robótica.....	65
6.3.2.	Mástil de madera.....	66
6.3.3.	Puente H L298N.....	66
6.3.4.	Tarjeta de programación Arduino.....	67
6.3.5.	Aplicación Android.....	67
6.3.6.	Módulo Bluetooth.....	68
7.	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	69
7.1.	DESCRIPCIÓN.....	69
7.2.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE PRUEBAS.....	70
7.3.	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	72
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	73
8.1.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.....	74
8.1.1.	Pared.....	74
8.1.2.	Sillas apiladas.....	76
8.1.3.	Persona.....	78
8.1.4.	Rama.....	80
8.1.5.	Tasa de falsa alarma.....	82
8.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LAS PRUEBAS.....	83
9.	CONCLUSIONES.....	84
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	86
11.	ANEXOS.....	90
	Anexo A: Compromiso de Confidencialidad CODALTEC.....	90
	Anexo B: Software de generación de la señal de transmisión en C.....	94
	Anexo C: Software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB.....	95
	Anexo D: Tablas con los datos obtenidos para cada obstáculo.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bosquejo básico del “Telemobiloskop”	11
Figura 2. Caza nocturno Vought F4U-4N Corsair.....	12
Figura 3. Típico prototipo de misil guiado de forma autónoma.....	13
Figura 4. Sistema de control autónomo de distancia y velocidad.....	14
Figura 5. Transbordador Endeavour e imagen 3D SAR de un volcán.....	14
Figura 6. Waymo, vehículo autónomo de Google.....	15
Figura 7. Esquema general de un radar biestático (Izquierda) y monoestático (Derecha).....	18
Figura 8. Presentación esquemática del modo de operación de un radar FMCW	21
Figura 9. Diagrama de bloques de un radar FMCW.....	22
Figura 10. Diagrama de bloques de un radar FMCW con demodulación I/Q.....	22
Figura 11. Señales típicas lineales FMCW.....	27
Figura 12. Rango de radares en un automóvil con ADAS.....	28
Figura 13. Ejemplo de dos módulos de un ADAS, Radar (Izquierda), Cámara (derecha).....	28
Figura 14. Prototipo de radar de guía para personas con discapacidad visual.....	29
Figura 15. Conversión de frecuencias usando un mixer.....	31
Figura 16. Entorno real con clutter.....	32
Figura 17. Fórmulas para el cálculo de la RCS de figuras geométricas simples....	33
Figura 18. Diseño planteado para el sistema radar móvil.....	35
Figura 19. Diagrama de bloques del sistema radar.....	36
Figura 20. Diagrama de bloques y sistema de antenas del K-LC6.....	38
Figura 21. Diagrama de radiación para el K-LC6.....	39
Figura 22. Gráfica de Frecuencia VS Voltaje VCO del K-LC6.....	40
Figura 23. Tarjeta STEMLab Red Pitaya.....	42
Figura 24. Señal de transmisión generada.....	43
Figura 25. Gráfica de voltaje vs periodo de la señal generada por el DAC.....	44
Figura 26. Respuesta en frecuencia de una rampa perfecta.....	44
Figura 27. Respuesta en frecuencia de una rampa escalonada.....	45
Figura 28. Circuito de acondicionamiento para la señal de transmisión.....	46
Figura 29. Circuito de acondicionamiento para la señal de transmisión.....	46
Figura 30. Salida de las señales I/Q puras.....	47
Figura 31. Circuito de acondicionamiento para nivel DC.....	48
Figura 32. Circuito de acondicionamiento para las señales I/Q.....	49
Figura 33. Adaptador USB Wi-Fi Edimax EW7811Un.....	51
Figura 34. Sistema de visualización de distancia implementado.....	52
Figura 35. Vista frontal del PCB diseñado (izquierda) y ensamblado (derecha)...	54
Figura 36. Vista trasera del PCB diseñado (izquierda) y ensamblado (derecha)...	54
Figura 37. Compilación cruzada entre PC y STEMLab Red Pitaya.....	55
Figura 38. Conexión remota vía SCPI.....	56
Figura 39. Diagrama de flujo del software de generación de la señal Tx.....	57

Figura 40. Diagrama de flujo del software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB.....	59
Figura 41. Señales I/Q obtenidas cuando no hay un blanco presente (a) y cuando sí lo hay (b).....	60
Figura 42. Señales I/Q obtenidas luego de aplicar filtros digitales LPF Y HPF.....	61
Figura 43. Alineación de las señales I/Q.....	61
Figura 44. Sección de las señales I/Q que se plantea ignorar (en rojo).....	62
Figura 45. Sección de la parte útil de las señales I/Q.....	62
Figura 46. Gráfica del perfil de distancias.....	63
Figura 47. Interfaz gráfica en MATLAB del sistema radar móvil.....	64
Figura 48. Plataforma robótica móvil.....	65
Figura 49. Plataforma robótica móvil con mástil.....	66
Figura 50. Modulo Puente H L298N.....	66
Figura 51. Tarjeta de programación Arduino UNO.....	67
Figura 52. Interfaz de Aplicación Android.....	68
Figura 53. Módulo inalámbrico Bluetooth HC06.....	68
Figura 54. Obstáculos escogidos para las pruebas.....	69
Figura 55. Escenario escogido para realizar las pruebas.....	70
Figura 56. Sistema radar móvil en operación.....	72
Figura 57. Montaje de pruebas con obstáculo pared.....	74
Figura 58. Histograma resultante para obstáculo pared.....	75
Figura 59. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo pared.....	76
Figura 60. Montaje de pruebas con obstáculo sillas apiladas.....	76
Figura 61. Histograma resultante para obstáculo sillas apiladas.....	77
Figura 62. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo sillas apiladas.....	78
Figura 63. Montaje de pruebas con obstáculo persona.....	78
Figura 64. Histograma resultante para obstáculo persona.....	79
Figura 65. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo persona.....	80
Figura 66. Montaje de pruebas con obstáculo rama.....	80
Figura 67. Histograma resultante para obstáculo ramas.....	81
Figura 68. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo rama.....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura de bandas de frecuencias según IEEE e ITU. (14).....	17
Tabla 2. Ventajas y desventajas de las tecnologías usadas para detección de obstáculos(16).....	19
Tabla 3. Valores de RCS típicos a 24GHz(16).....	34
Tabla 4. Características generales y posibles aplicaciones del K-LC6(34).....	38
Tabla 5. Parámetros del K-LC6(34).....	38
Tabla 6. Configuración de pines para el K-LC6.....	40
Tabla 7. Valores obtenidos tras el diseño de los circuitos de acondicionamiento..	51
Tabla 8. Consumo de los componentes del sistema.....	53
Tabla 9. Valores de $z\alpha$ para diferentes niveles de confianza.....	71
Tabla 10. Valores de $z\beta$ para diferentes niveles de poder estadístico.....	71
Tabla 11. Valores estadísticos para obstáculo pared.....	75
Tabla 12. Valores estadísticos para obstáculo sillas apiladas.....	77
Tabla 13. Valores estadísticos para obstáculo persona.....	79
Tabla 14. Valores estadísticos para obstáculo rama.....	81
Tabla 15. Tasa de falsa alarma del sistema radar.....	82

CLÁUSULA DE CONFIDENCIALIDAD

Debido a lineamientos de protección de propiedad intelectual, la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa se guarda el derecho de reservar los secretos corporativos detrás de este proyecto. Para garantizar la discreción de la información relevante a los proyectos de la Corporación se realizó un acuerdo de confidencialidad, al final del presente libro se anexa (ver Anexo A) una copia del formato en donde se explican todos los términos y condiciones de la cláusula.

CAPÍTULO 1. INFORME FINAL DEL PROYECTO

RESUMEN

Recientemente han surgido nuevas aplicaciones para los sistemas radar, tanto en el campo civil como en el militar y el comercial. Estas nuevas aplicaciones exigen que el radar no solamente permanezca fijo, sino que también funcione mientras está en movimiento. La ventaja de este tipo de sensor todo tiempo es que puede funcionar en condiciones de visibilidad reducida: de noche, con humo, con niebla, etc. Adicionalmente, hoy en día se pueden obtener módulos de bajo costo para desarrollo, como el sensor descrito en este informe.

En este documento se presenta una síntesis del trabajo de grado realizado durante la pasantía “INTEGRACIÓN DE COMPONENTES HARDWARE Y SOFTWARE PARA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR RADAR LFMCW SOBRE UNA PLATAFORMA MÓVIL PARA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS”, en el cual se realiza la validación de un radar que opera a frecuencias centimétricas y se efectúa un estudio sobre cómo se comporta mientras se encuentra en movimiento. Como módulo radar se emplea el sensor K-LC6 del fabricante RFbeam Microwave GmbH, como plataforma de hardware para la generación y adquisición de las señales se usa una STEMLab Red Pitaya y como soporte de software para el procesamiento y la visualización se utiliza MATLAB.

El proyecto se realizó por modalidad pasantía en convenio con la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa CODALTEC, para terminar los estudios de pregrado y obtener el título de ingeniero electrónico. Es menester aclarar que lo más importante de realizar una práctica profesional es la inmersión en el mundo laboral, en donde se obtienen beneficios como la aplicación de conocimientos teóricos a la práctica, el conocimiento de la dinámica de una empresa real y de personas experimentadas que trabajan en el mismo campo de acción, el descubrimiento del trabajo en equipo y la adquisición de experiencia laboral formal.

Palabras clave: Radar LFMCW, STEMLab Red Pitaya, MATLAB, procesado de señal radar, medición de distancia, radar de corto alcance, detección de obstáculos.

ABSTRACT

Recently new applications have emerged for radar systems, both in the civil, military and commercial fields. These new applications require that the radar not only remain stationary, but also operate while in motion. The advantage of this kind of sensor all-weather is that it can work in conditions of reduced visibility: at night, with smoke, with fog, etc. Additionally, nowadays you can obtain low cost modules for development, such as the sensor described in this report.

This document presents a synthesis of the work done during the internship "INTEGRATION OF HARDWARE AND SOFTWARE COMPONENTS FOR VALIDATION OF THE OPERATION OF A LFMCW RADAR SENSOR ON A MOBILE PLATFORM FOR OBSTACLES DETECTION", in which the validation of a radar that operates at centimetric frequencies and a study is carried out on how it behaves while it is in motion. As a radar module, the K-LC6 sensor from the manufacturer RFbeam Microwave GmbH is used, as a hardware platform for the signal generation and acquisition a STEMLab Red Pita ya is used, and MATLAB is used as software support for processing and visualization.

The project was carried out by an internship modality in agreement with the Corporación de Alta Tecnología para la Defensa CODALTEC, to finish the undergraduate studies and obtain the title of electronic engineer. It's necessary to clarify that the most important thing of doing a professional practice is the immersion in the labor world, where benefits are obtained such as the application of theoretical knowledge to practice, knowledge of the dynamics of a real company and experienced people working in the same field of action, the discovery of teamwork and the acquisition of formal work experience.

Keywords: *LFMCW Radar, STEMLab Red Pitaya, MATLAB, radar signal processing, distance measurement, short range radar, obstacles detection.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las aplicaciones de los radares no solamente se encuentran en el campo militar, sino que también han pasado a formar parte de la vida del común de la ciudadanía. El ámbito de la defensa ha sido durante décadas impulsor, por no decir creador, de algunos de los principales avances tecnológicos para toda la población, los radares son un clave ejemplo de ello. La necesidad de explorar y detallar vastas superficies terrestres ha impulsado el desarrollo de técnicas de teledetección o detección remota, las cuales permiten adquirir la información de distancia mediante las radiaciones electromagnéticas.

Según la Superintendencia de Vigilancia y Seguridad Privada, el mercado de monitoreo y vigilancia en Colombia ha tenido un aumento del 140% en los últimos años y al 2014 estaba valorado en 7.53 billones de pesos (1). Esto lo hace un sector muy favorable para la inversión en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. La tecnología radar tiene como una de sus principales ventajas la capacidad de detección sin importar condiciones como luz, oscuridad, lluvia, viento, respecto a otro tipo de tecnologías como los sistemas optrónicos, de infrarrojos, láser o ultrasónicos que no lo hacen en cualquier condición. Por esta razón es una tecnología que está en auge y se ha involucrado con el mercado de monitoreo y vigilancia.

En Colombia, La Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC) es la única empresa que ha desarrollado productos radar, con un sistema de defensa aérea y un sistema de monitoreo terrestre de corto alcance. El personal de esta empresa entregó en el año 2017 los primeros radares hechos por ingenieros colombianos: El Radar táctico de defensa aérea (TADER) y el Radar de vigilancia superficial (SINDER).

El proyecto consiste en validar de forma compacta el funcionamiento de un radar LFM CW en banda K de corto alcance para aplicaciones de detección de obstáculos mientras éste se encuentra en movimiento. Este trabajo fue desarrollado bajo la modalidad de pasantía ante la Universidad de los Llanos (UNILLANOS); y forma parte de las tareas iniciales para aplicaciones de radar que se pretenden desarrollar en CODALTEC.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el campo de la teledetección, el grupo de Investigación y desarrollo de sensores (GIDS) de CODALTEC cuenta con experiencia en el uso de la tecnología de microondas, permitiendo el desarrollo de dispositivos propios y adaptados a las distintas aplicaciones de observación remota de objetos y superficies. Entre las aplicaciones de sistemas activos, realizaron diseños y validaciones de prototipos de radar de onda continua (CW) a 10.525 GHz (Banda X) y 24.125 GHz (Banda K) modulado en frecuencia (FMCW) para aplicaciones de corto alcance. Los ingenieros de GIDS han realizado pruebas con radares fijos, sin embargo, actualmente están estudiando el comportamiento de un radar cuando se encuentra sobre una plataforma en movimiento, ya que están estudiando posibles aplicaciones donde opere un radar móvil. Es por esta razón que requieren de practicantes para que les ayuden validando la información que arrojan dichos sensores al emplearlos sobre una plataforma móvil.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Validar el funcionamiento de un prototipo de radar colocado en una plataforma móvil empleando un sensor radar LFM CW para detección de obstáculos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar el diseño funcional e implementar un prototipo radar LFM CW para la ejecución de pruebas.

Desarrollar el procesamiento de datos y la comunicación pertinente entre el sensor radar y el sistema embebido para validar los algoritmos del sensor, obteniendo así la distancia estimada del obstáculo.

Integrar los componentes de hardware y software e implementar un protocolo de pruebas para el sensor radar ubicado sobre la plataforma móvil

3. JUSTIFICACIÓN

El programa de ingeniería electrónica de la Universidad de los Llanos forma profesionales comprometidos con el desarrollo de la región, por lo cual dentro de las diferentes opciones de grado se encuentra la modalidad de pasantía; esta debe desarrollarse en empresas e instituciones que garanticen los objetivos del programa, la finalización del proceso educativo y el inicio del proceso laboral. Una de estas empresas es la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC), con la cual se tiene un convenio marco vigente de colaboración en los campos de investigación, desarrollo innovación y fomento de capacidades firmado en agosto de 2013.

La constante necesidad del ser humano por obtener información detallada acerca de objetos y/o superficies desconocidas ha provocado, junto a los grandes avances tecnológicos de las últimas décadas, el desarrollo de técnicas de adquisición de información. Los sistemas radar son muy efectivos en aplicaciones de detección de obstáculos debido a que funcionan bajo cualquier condición meteorológica.

El grupo de investigación y desarrollo de sensores (GIDS) busca estudiar el comportamiento del sensor radar de onda continua en frecuencia modulada lineal (LFMCW) frente a la detección de obstáculos sobre una plataforma móvil para aplicaciones diversas como por ejemplo navegación autónoma o detección temprana de colisiones, entre otras. Para lograr este objetivo será necesario realizar una revisión bibliográfica, diseños, implementación y pruebas de validación.

4. METODOLOGIA

Como ya se ha explicado en el capítulo de introducción, objetivos y justificación, el propósito de este trabajo de pasantía es la validación del funcionamiento de un sistema radar embarcado sobre una plataforma móvil.

Para la realización del proyecto se optó por una metodología que permite cubrir tanto el desarrollo de hardware como el software, esta metodología agrupó las tareas en cinco etapas:

4.1. Etapa 1: Fundamentos teóricos de sistemas embebidos

Esta etapa incluye las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica de sensores radar LFM CW
- Introducción a sistemas embebidos usando sistema de procesamiento

4.2. Etapa 2: Análisis y diseño de los elementos del sistema (HW)

Esta etapa incluye las siguientes actividades:

- Análisis e implementación de fuente de alimentación
- Análisis de interconexiones del sistema.
- Análisis y diseño de estructura para pruebas

4.3. Etapa 3: Diseño e implementación de los elementos del sistema (SW)

Esta etapa incluye las siguientes actividades:

- Implementación y validación de sensor radar LFM CW
- Diseño e implementación de visualización y grabado de datos
- Diseño e implementación de procesamiento de datos y comunicación entre sensor radar LFM CW y sistema embebido

4.4. Etapa 4: Integración y validación del dispositivo

- Integración de elementos del sistema radar
- Diseño e implementación de protocolo de pruebas para sensor radar LFM-CW

4.5. Etapa 5: Documentación general y finalización del proyecto

- Redacción de artículo de investigación
- Informe universidad
- Cierre de pasantía

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONTEXTUAL

Villavicencio es la capital del departamento del Meta en Colombia, se encuentra ubicado a 90 Km de Bogotá D.C sobre el Piedemonte de la Cordillera Oriental a un costado izquierdo del río Guatiquía. Es el centro comercial más importante de los Llanos Orientales por sus funciones administrativas, de acopio y abastecimiento regional; también es muy fuerte en sus sectores económicos de industria (alimentos y bebidas manufacturadas, muebles, calzado, molinos de arroz y la reparación de vehículos automotores, principalmente), agropecuario (agricultura, ganadería, caza, pesca y explotación de maderables), construcción y turismo, generando un aporte anual al PIB nacional del 2% (2). Tiene una población urbana de 495 200 habitantes; localiza en su casco urbano las sedes de la Gobernación del meta, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio, la Electrificadora Del Meta, la sucursal del Banco de la República de Colombia, la Cámara De Comercio De Villavicencio y más recientemente la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa, CODALTEC.

La modernización del Estado colombiano y dinámica económica mundial modifican los métodos tradicionales de planificación centralizada, exigiendo a la región un mayor conocimiento de la estructura, dinámica y evolución de su economía, especialmente de los sectores de la producción agrícola, pecuaria y agroindustrial y más recientemente en el sector tecnológico.

Por tal razón en Colombia desde hace varios años, se ha buscado la manera de innovar en muchos sectores a través de la tecnología, el reciente ingreso de Colombia a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) implica una serie de compromisos y retos especialmente desde la ciencia y la tecnología donde el requerimiento es asegurar y garantizar beneficios para la población a partir de los avances científicos y tecnológicos se debe entonces compartir la misma visión por todos los países miembros que implica un crecimiento económico sostenido, creación de empleos de calidad y fortalecimiento del bienestar a través de la ciencia y la tecnología, lo que implica que el país debe posicionar estas temáticas como elemento fundamental para el desarrollo sustentable (3).

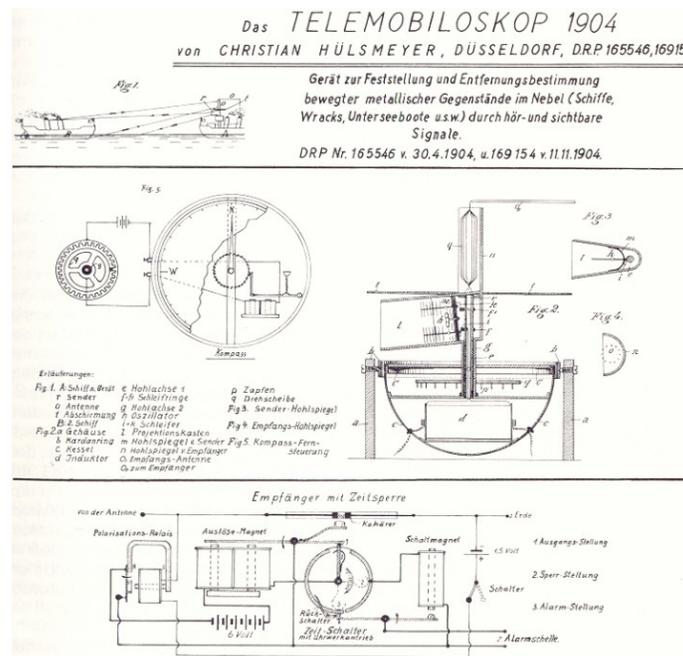
Asimismo, Las Fuerzas Armadas Colombianas han dejado a un lado la importación de aviones no tripulados que eran ofrecidos principalmente por Israel, a fabricar y probar drones y barcos fluviales. Además, las Fuerzas Armadas en conjunto con CODALTEC y las empresas españolas Indra Sistemas S.A. y ART S.A., se encargaron de entregar los dos primeros radares hechos principalmente por ingenieros colombianos, entregados en el 2017 (4). Todo lo anterior con el fin

de crear un avance tecnológico en el país, realizado a nivel nacional logrando que sea de alta calidad, ampliando además el horizonte y alcance del potencial en las nuevas tecnologías colombianas.

5.2. ESTADO DEL ARTE

Un radar es un dispositivo que usa ondas electromagnéticas de radiofrecuencia, para determinar la posición u otras características de un blanco. La tecnología radar ha sido usada históricamente en sistemas militares, inclusive determinó un papel fundamental durante el desarrollo y la finalización de la segunda guerra mundial.

La primera aproximación de un radar se dio en 1904, cuando Christian Hülsmeyer, de 22 años en ese momento, hizo una presentación notable de un aparato llamado “*Telemobiloskop*”, que era básicamente un transmisor y receptor de radio, capaz de apuntar con sus antenas hacia el río y hacer sonar de manera confiable una campana cada vez que pasaba un barco. La frecuencia de operación era en el orden de los cientos de Megahertz, podía girar 360° y estimar la dirección del blanco. Sin embargo, este aparato no era capaz de medir la distancia a los objetivos y sus aplicaciones casi que permanecieron desapercibidas durante las primeras 3 primeras décadas del siglo XX.



Sólo a principios de la década del siglo pasado, en varios países de Europa y en el extranjero, finalmente se reconoció el valor del principio del radar, basado principalmente en su potencial militar. A partir de ese momento es muy difícil obtener una imagen ininterrumpida de todos los desarrollos de radar, independientes entre sí al principio y luego vinculados cada vez más, que se topan con una lucha de acción y reacción durante la Segunda Guerra Mundial.

Los radares de primera generación se basaron principalmente en tecnología de alta frecuencia analógica y su desarrollo estuvo dominado por especialistas en antenas y alta frecuencia. Países como Alemania, Estados Unidos, Inglaterra, Francia, entre otros, simultáneamente trabajaban en el desarrollo del radar durante finales de los años 1930 e inicios de los años 1940. Se desarrollaron aparatos que operaban en frecuencias en el orden de lo Megahertz (MHz) y transmitían con potencias en el orden los Kilowatts (Kw).

Luego, con la invención del magnetrón se pasó a operar en frecuencias de microondas, y dado a que se necesitaban antenas más pequeñas para poder transmitir ese rango de frecuencias, podían transportarse en aviones de combate como ayuda a la detección de enemigos. El primer caza nocturno estadounidense, el *Vought F4U-4N Corsair*, estaba equipado con un radar desde 1944, el cual funcionaba en el rango de 10 GHz. (5)

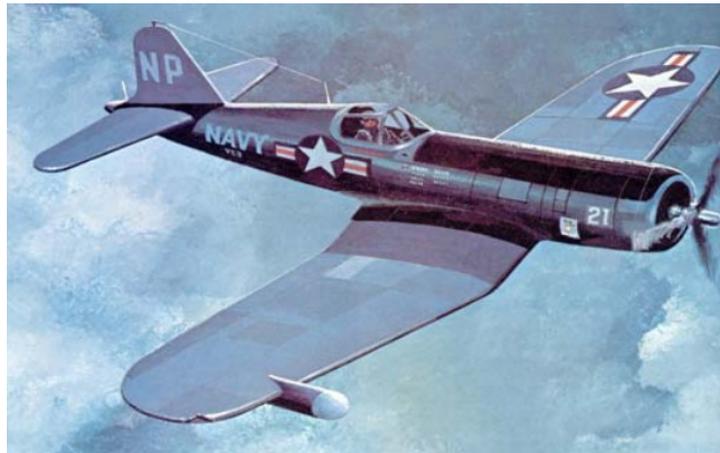


Figura 2. Caza nocturno Vought F4U-4N Corsair

Fuente: The Century of Radar (5)

El radar ha sido altamente influenciado por la tecnología de microondas, y también el desarrollo de microondas se ha visto significativamente afectado por las necesidades del radar. Las fases y elementos clave en el desarrollo de microondas y radar incluyen:

- La introducción del radar de microondas en la Segunda Guerra Mundial como un factor importante para que los Aliados logren el éxito en la defensa aérea y en la guerra antisubmarina.

- Avances del radar de microondas durante y después de la guerra.
- Aplicaciones militares y civiles actuales.
- La dependencia del radar moderno en el procesamiento digital (con velocidades de reloj en las frecuencias de microondas). (6)

Merril Skolnik, autor del libro “*Radar Handbook*” explica que las microondas y el radar se han beneficiado mutuamente y que el radar aún ofrece muchas oportunidades para que los ingenieros que trabajan con las frecuencias de microondas demuestren su ingenio y creatividad. (6)

Las principales aplicaciones de la tecnología radar hoy en día operan a frecuencias extremadamente altas, en la banda W (75 a 110 GHz). En el campo militar, por ejemplo, se emplean para desarrollar cabezas de búsqueda de radar para misiles y municiones guiadas de forma autónoma. Debido a las longitudes de onda muy cortas (aproximadamente 3 mm), se pueden realizar módulos bastante compactos, así como pequeñas antenas con una ganancia relativamente alta. (7)

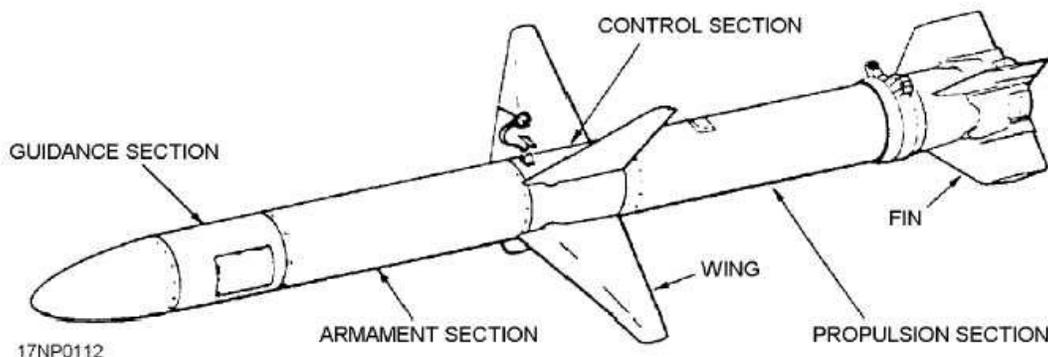


Figura 3. Típico prototipo de misil guiado de forma autónoma

Fuente: *Integrated Publishing* (7)

Comercialmente hablando, el sistema de control autónomo de distancia y velocidad (ACC, por sus siglas en inglés) es el que mayor impacto ha tenido recientemente. Este sistema usualmente funciona a 77 GHz y utiliza formas de onda continua con modulación en frecuencia (FMCW, por sus siglas en inglés), por lo cual, las potencias de transmisión típicas están alrededor de 10 mW para rangos de 2 a 150 m. El sistema de radar calcula constantemente la distancia entre el vehículo en el que está montado y el vehículo que está enfrente, y alerta al conductor cuando ambos se acercan demasiado. (5)



Figura 4. Sistema de control autónomo de distancia y velocidad

Fuente: Volkswagen Technology(8)

A finales del siglo pasado la NASA inició el programa "Misión al planeta Tierra" con el objetivo de observar la tierra y el medio ambiente en el espacio utilizando el radar. El transbordador espacial *Endeavour* fue la plataforma para esos experimentos. En una cooperación de NASA/JPL (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio / Laboratorio de Propulsión a Chorro), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) y ASI (Agenzia Spaziale Italiana) se desarrollaron dos sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda C y X: SIR-C (Shuttle Imaging Radar, Versión C) a 5.3 GHz y X-SAR a 9.6 GHz. Además, un SAR de banda L estaba a bordo. Los radares funcionaban de forma sincrónica y podían obtener cartografías en 3 dimensiones. (5)

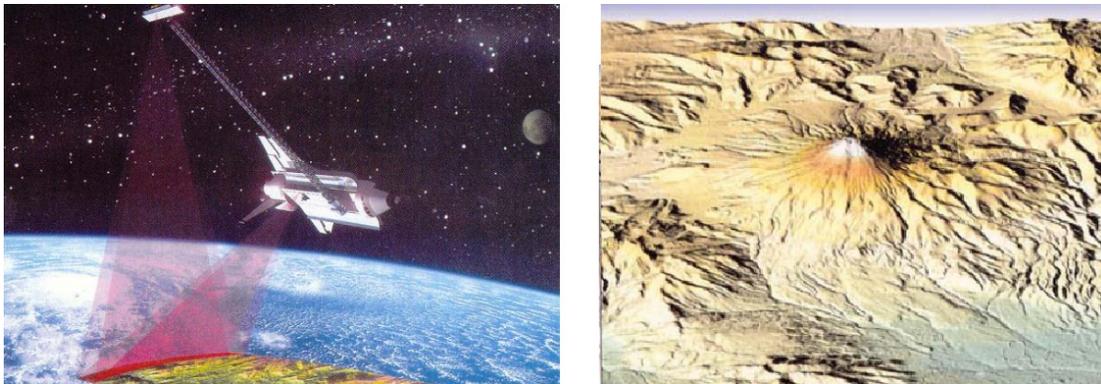


Figura 5. Transbordador Endeavour e imagen 3D SAR de un volcán

Fuente: *The Century of Radar* (5)

En los últimos años se han producido algunos desarrollos interesantes en la arquitectura de sistemas y algoritmos, formas de onda, procesamiento de señales,

materiales, circuitos, embalajes, dispositivos, electromagnéticos y el diseño de las antenas. Hoy en día, los sistemas de radar se han vuelto mucho más complejos y generalmente están integrados en sistemas multi sensor. Un gran ejemplo de este tipo de sistemas es el vehículo autónomo de Google Waymo, que en el año 2017 salió a las calles por primera vez sin conductor de seguridad. Waymo incorpora tecnología LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*), cámaras que le proveen al vehículo 360° de visión, sensores para conducción segura y como no, radares que lo dotan le proveen la detección, la estimación de la distancia y la velocidad de los demás vehículos aún incluso en condiciones climáticas difíciles como lluvia o niebla. (9)

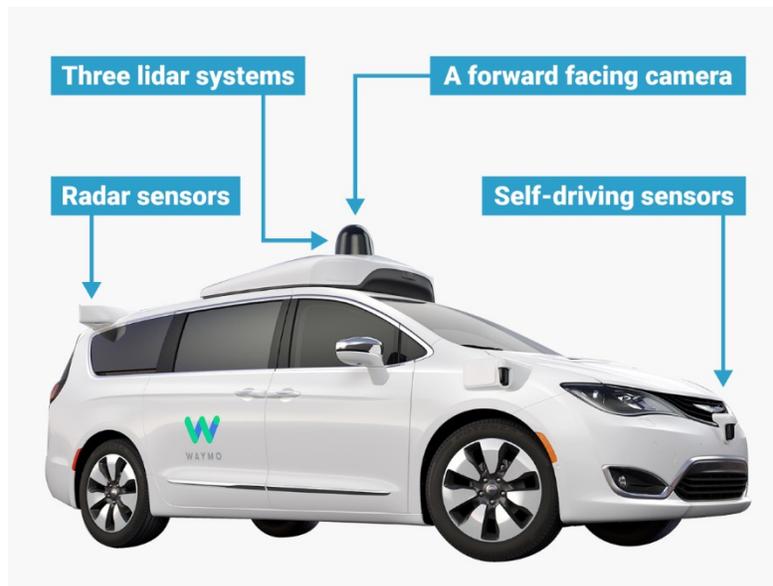


Figura 6. Waymo, vehículo autónomo de Google.

Fuente: Fusion Worldwide(9)

A nivel mundial, la tecnología radar tiende hacia el uso de elementos de estado sólido, que son más compactos y permiten extraer más información que los amplificadores de radiofrecuencia clásicos que usaban elementos como el magnetrón. Además, estos tipos de radares ahora tienen un barrido electrónico, a diferencia del barrido mecánico mediante giro de la antena tradicional de los radares. Los tipos de forma de onda con los que se alimentan los radares han ido cambiando a lo largo del tiempo, utilizando ahora para estas aplicaciones formas de onda continua con modulación en frecuencia y fase. (10)

5.3. MARCO TEÓRICO

5.3.1. Introducción a los sistemas de radar

Radar es un acrónimo inglés de las palabras *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging que fue acuñado en 1940 por la Marina de los Estados Unidos. Es un sensor electromagnético principalmente usado para la detección y ubicación de los objetos reflectivos. Fue desarrollado a principios del siglo XX antes y durante la Segunda Guerra Mundial, y se usó como un dispositivo de detección para advertir sobre el acercamiento de aviones hostiles y para dirigir armas antiaéreas.

En breve, el funcionamiento del radar puede resumirse de la siguiente manera:

- El radar radia la energía electromagnética a través de una antena y la propaga en el espacio.
- Parte de la energía radiada se intercepta por un objeto reflectivo, generalmente llamado blanco, ubicado a cierta distancia del radar.
- La energía interceptada por el objetivo es reflejada en muchas direcciones
- Parte de la energía reflejada (eco) se devuelve y es recibida por la antena receptora del radar.
- Este eco es amplificado en el receptor y con ayuda del procesado de la señal, se debe decidir si el eco producido por el objeto a la salida del receptor representa si se trata de un blanco o no. Al mismo tiempo, se adquiere la ubicación del blanco y otra posible información sobre el mismo.

Algunos radares tienen que detectar los blancos en corto alcance como la distancia entre el punto del lanzador hasta el punto donde se encuentra el bateador en un campo de béisbol (para medir la velocidad de una pelota accionada), mientras otros radares tienen que operar en distancias tan grandes como la de otros planetas. Por lo tanto, un radar podría caber en la palma de una mano o ser tan grande como para ocupar el espacio de muchos campos de fútbol.

Los blancos del radar pueden ser aeronaves, buques o misiles; pero los blancos también pueden ser personas, aves, insectos, precipitaciones, turbulencia del aire, medios ionizados, características terrestres (vegetación, montañas, carreteras, ríos, aeropuertos, edificios), mar, hielo, icebergs, boyas, meteoros, auroras, naves espaciales, y planetas. Además de medir la distancia y la dirección angular de un blanco, un radar también puede encontrar la velocidad relativa de un blanco, determinando la tasa de cambio temporal del rango de detecciones o por

extracción de la velocidad radial a partir de la variación de la frecuencia Doppler de la señal de eco. Si la ubicación de un blanco en movimiento se mide en un periodo de tiempo, la trayectoria del objetivo puede encontrar la velocidad absoluta del blanco y se puede determinar una velocidad absoluta del blanco y estimar su trayectoria futura. Los radares diseñados correctamente pueden determinar el tamaño y la forma de un blanco y podría incluso diferenciar un tipo de blanco de otro. (11)

Desde su invención en la década de los 40, los sistemas radar han utilizado fundamentalmente para detectar la posición e incluso la velocidad de blancos alejados, mediante la transmisión y recepción de radiación electromagnética. En las últimas décadas los sistemas radar han sufrido una evolución constante. La emergente demanda de sistemas radar, tanto en el campo militar como en el campo de la industria civil, promueve el estudio de nuevas arquitecturas y nuevas técnicas que mejoren las distintas características de este tipo de sensor. (12)

5.3.2. Clasificación de los radares

La clasificación de los radares puede ser variada, ya que existen radares cuya operación está basada en el suelo, aire, vehículos espaciales o barcos. También se pueden clasificar en características específicas del radar, tales como la banda de frecuencia, el tipo de antena y la forma de onda utilizadas. Otra clasificación se refiere a la misión y/o funcionalidad del radar, esto incluye: Radar meteorológico (clima), adquisición y búsqueda, seguimiento, control de incendios, alerta temprana, y los radares de evitación de colisiones. (13) Este informe se centra en las características específicas del radar.

De acuerdo con la frecuencia de operación, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE y la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT clasifican los radares según como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de bandas de frecuencias según IEEE e ITU. (14)

Nomenclatura de las bandas de frecuencias			
IEEE Standard 521-2002		ITU (region-2 radiolocation service allocation)	
Designación	Frecuencia	Banda designada	Frecuencia
HF	3 – 30 MHz	VHF	138 – 144 MHz 216 – 225 MHz
VHF	30 – 300 MHz	UHF	420 – 450 MHz 890 – 942 MHz
UHF	300 – 1000 MHz	L	1.215 – 1.400 GHz
L Band	1 – 2 GHz	S	2.3 – 2.5 GHz 2.7 – 3.7 GHz
S Band	2 – 4 GHz	C	5.250 – 5.925 GHz
C Band	4 – 8 GHz	X	8.500 – 10.680 GHz
X Band	8 – 12 GHz	Ku	13.4 – 14.0 GHz 15.7 – 17.7 GHz

Nomenclatura de las bandas de frecuencias			
Ku Band	12 – 18 GHz	K	24.05 – 24.25 GHz 24.65 – 24.75 GHz
K Band	18 – 27 GHz	Ka	33.4 – 36.0 GHz
Ka Band	27 – 40 GHz	V	59.0 – 64.0 GHz
V Band	40 – 75 GHz	W	76.0 – 81.0 GHz 92.0 – 100.0 GHz
W Band	75 – 110 GHz	mm	126.0 – 142.0 GHz 144.0 – 149.0 GHz
mm Band	110 – 300 GHz		231.0 – 235.0 GHz 238.0 – 248.0 GHz

En función del número de antenas se distinguen entre estos tres tipos de sistemas radar:

Monoestático: una sola antena transmite y recibe.

Biestático: una antena transmite y otra recibe, en el mismo o diferente emplazamiento.

Multiestático: combina la información recibida por varias antenas.

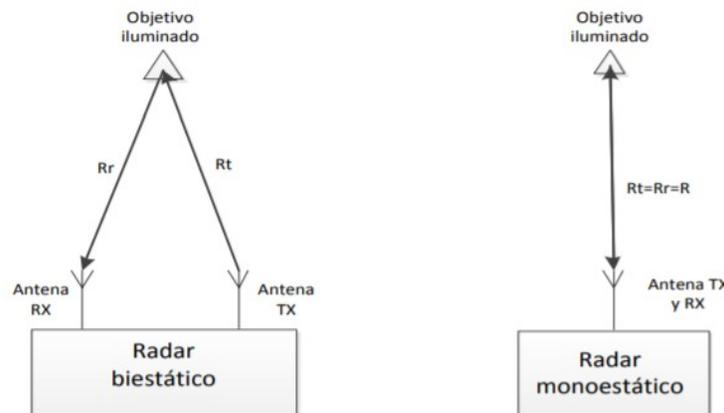


Figura 7. Esquema general de un radar biestático (Izquierda) y monoestático (Derecha).

Fuente: Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W (15)

En función de la señal transmitida se distingue dos tipos, el radar pulsado y el radar de onda continua.

1. El radar pulsado envía señales en ráfagas muy cortas, pero de una potencia muy elevada. Para poder determinar la distancia, el radar de pulsos mide el tiempo que la señal tarda en alcanzar el objetivo y volver al receptor. Se calcula la

distancia a partir de este tiempo y la velocidad de propagación de una onda electromagnética.

2. El radar de onda continua o CW reduce considerablemente la potencia del pico en transmisión respecto al radar de pulsos. El transmisor de CW genera ondas de radiofrecuencia de forma continua no moduladas de frecuencia constante, que pasan a la antena y viajan a través del espacio hasta que son reflejadas por un objeto. El radar CW puede medir la velocidad basada en el efecto Doppler, pero no tiene capacidad de extraer la información sobre el rango del objeto debido a la falta de referencia temporal. Una mejora sobre el radar CW justifica el empleo del radar de onda continua modulando la frecuencia periódicamente con el tiempo (FMCW). Se realiza utilizando la frecuencia de batido f_b que es la diferencia de la frecuencia instantánea entre la frecuencia de emisión con la de recepción, utilizando un mezclador y así se obtiene información de la distancia.

5.3.3. Comparación de las características del radar

Las tecnologías que compiten principalmente con la tecnología de radar son las que emplean sensores de infrarrojos y de ultrasonido.

Un sensor infrarrojo se diferencia de un sensor de radar básicamente por el hecho de que detecta preferentemente movimientos tangenciales u ortogonales, ya que cambian el patrón de temperatura. Sin embargo, es relativamente insensible a los movimientos directamente hacia adelante o atrás del sensor, mientras que el sensor de radar es ciego a los movimientos ortogonales reales, sin embargo, es extremadamente sensible a los movimientos radiales.

La tecnología de ultrasonido se limita a distancias cortas (<1.5 m) y sufre de sensibilidad a los impactos ambientales y la necesidad de que el transductor tenga acceso directo al medio de propagación requerido "aire", lo cual obliga que el sensor se haga visible.

En la Tabla 2 explican las ventajas y desventajas de las tecnologías individuales basadas en la física de la generación y propagación de energía. (16)

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las tecnologías usadas para detección de obstáculos(16)

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor detectando movimientos tangenciales y ortogonales - Gran ángulo de detección tanto en dirección horizontal como vertical. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificultad ante movimientos radiales - Sensible a influencias atmosféricas (lluvia, nieve, polvo y cambios de temperatura bruscos)

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> - Barato en la versión más simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Díficil para ser montado de forma invisible, se requieren complejos rada- mos de alta calidad. - Solo detecta presencia, no hay infor- mación sobre velocidad, dirección de movimiento y distancia.
	<ul style="list-style-type: none"> - Muy bajo costo - Se puede hacer triangulación - Información precisa en rangos cer- canos 	<ul style="list-style-type: none"> - Rango muy limitado (<1.5m) - Sensible a influencias atmosféricas como ruido, viento y cambios bruscos de temperatura - El sensor siempre debe estar visible - No hay información sobre velocidad y dirección de movimiento
	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor detectando movimiento ra- dial - Relativamente insensible a in- fluencias atmosféricas (Lluvia, nie- ve, polvo, cambios bruscos de temperatura) - Puede penetrar materiales no me- tálicos, por lo cual se puede poner dentro de un radomo de bajo cos- to. - Medición de distancia a grandes alcances y clasificación de diferen- tes tipos de blancos - Presenta información sobre velo- cidad y dirección de movimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Ángulo limitado de detección - Mala detección de movimientos tan- genciales u ortogonales - Más costoso que los sensores de in- frarrojo o ultrasónicos - Prejuicio de los usuarios finales contra la "radiación" - Tiene dificultad para identificar obje- tos a corto alcance

5.3.4. Radar FMCW

El radar FMCW (Onda Continua Frecuencia Modulada, por sus siglas en inglés) difiere del radar pulsado en que una señal electromagnética se transmite continuamente. Además, la frecuencia de esta señal cambia con el tiempo,

generalmente en un barrido a través de un ancho de banda establecido. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y recibida (reflejada) se determina mezclando las dos señales, produciendo una nueva señal que se puede medir para determinar la distancia o la velocidad. La función diente de sierra es el cambio más simple y más utilizado en el patrón de frecuencia para la señal emitida.

5.3.3.1. Modo de operación de un radar FMCW

El radar FMCW emite una señal de RF que generalmente se barre linealmente en frecuencia. La señal recibida se mezcla con la señal emitida y, debido al retraso causado por el tiempo de vuelo de la señal reflejada, habrá una diferencia de frecuencia que se puede detectar como una señal en el rango de bajas frecuencias. Dado a que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, se puede convertir el tiempo de retardo en una distancia precisa. Cuando hay varios blancos, la señal de salida es la suma de diferentes frecuencias y las distancias a los objetivos se pueden obtener de manera eficiente usando la transformada de Fourier. Una presentación esquemática se muestra en la Figura 8.

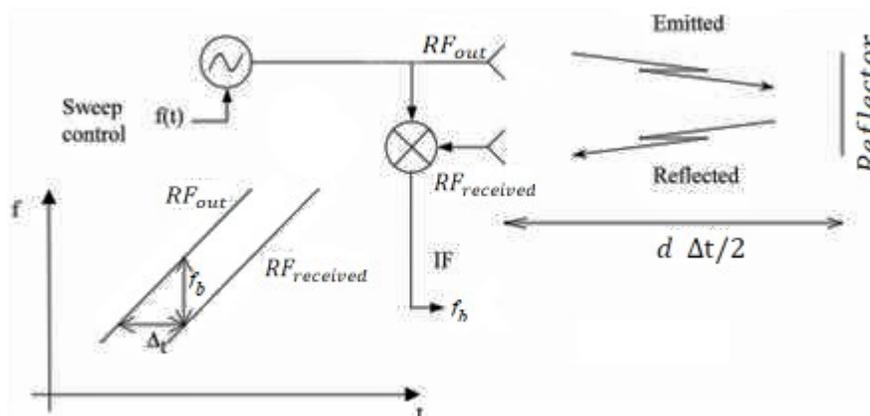


Figura 8. Presentación esquemática del modo de operación de un radar FMCW

Fuente: FMCW Radar-App-Note (17)

Debido al tiempo de retardo, Δt , causado entre la señal emitida viajando la distancia al reflector y el eco recibido en el receptor, habrá una pequeña diferencia en la frecuencia de la señal entre las dos señales de radio frecuencia (RF). Esto se emite como una señal de frecuencia intermedia (IF) con frecuencia f_b (frecuencia de batido).

Un diagrama de bloques general de un radar FMCW se muestra en la Figura 9.

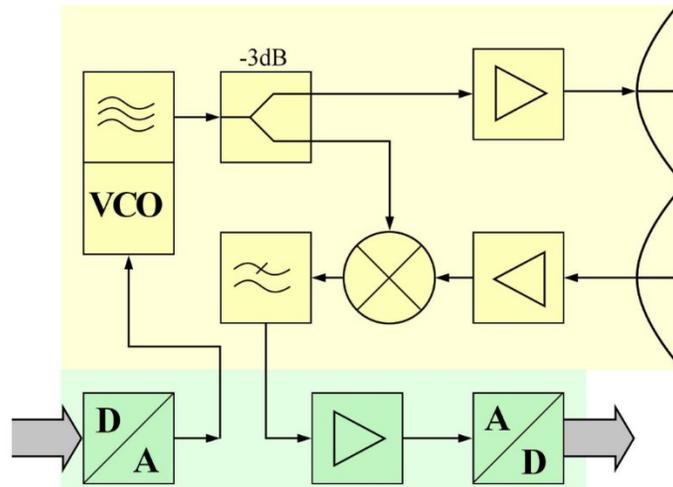


Figura 9. Diagrama de bloques de un radar FMCW

Fuente: Radar Tutorial (18)

Algunos radares FMCW incorporan demodulación I/Q, la señal demodulada en fase es la I, y la señal demodulada en cuadratura es la Q. En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques del sistema de radar empleado en (19), ese radar emplea ese tipo de demodulación.

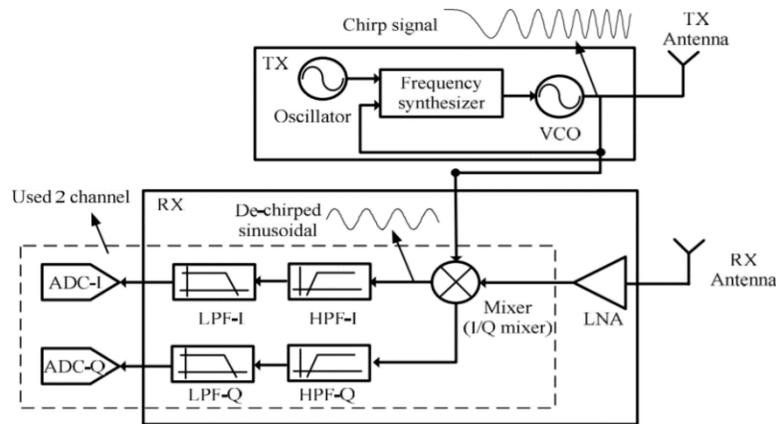


Figura 10. Diagrama de bloques de un radar FMCW con demodulación I/Q

Fuente: Elektronika ir elektrotechnika issn1392-1215,vol.21,no.6,2015 (19)

5.3.3.2. Cálculo de distancia en un radar FMCW

Para obtener la frecuencia de batido f_b se puede partir de la siguiente manera: suponga que el generador de señal de RF emite una frecuencia que está cambiando linealmente a lo largo del tiempo:

$$f_{RF\text{Emitida}} = f_{RF0} + k_f * t, 0 \leq t < T \quad \text{Ecuación 1}$$

1

Donde f_{RF0} es la frecuencia de inicio, T es el tiempo de barrido total y k_f es la pendiente del cambio de frecuencias, o bien, la tasa de barrido:

$$k_f = \frac{BW}{T} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde BW , es el ancho de banda del barrido frecuencial. Ahora bien, el tiempo de retardo producido entre la señal emitida y el eco recibido puede calcularse como:

$$\Delta t = 2 \frac{R}{c} \quad \text{Ecuación 3}$$

3

Donde R es la distancia entre el blanco y la antena del radar y c es la velocidad de la luz. Debido al tiempo de retardo, la frecuencia de la señal emitida comparada con la recibida es:

$$f_{RF\text{Recibida}} = f_{RF0} + k_f * (t - \Delta t), \Delta t \leq t < T + \Delta t \quad \text{Ecuación 4}$$

4

Comparando la Ecuación 4 con la Ecuación 1 se puede determinar la frecuencia de batido f_b , la cual no es sino la diferencia entre $f_{RF\text{Recibida}}$ y $f_{RF\text{Emitida}}$, así:

$$f_b = k_f * (-\Delta t) \quad \text{Ecuación 5}$$

5

El signo menos se puede omitir ya que la frecuencia de salida de la señal real del detector de radar se ajusta a una frecuencia positiva. Teniendo en cuenta esto y reemplazando la ecuación 2 y la ecuación 3 en la ecuación 5 se tiene que:

$$f_b = \frac{BW}{T} * 2 \frac{R}{c} \quad \text{Ecuación 6}$$

6

Para medir la distancia a la que se encuentra el blanco, se podrían colocar n filtros paso-banda suficientemente estrechos, y centrados en las frecuencias de batido esperadas. Dependiendo en qué filtro se detecta la señal recibida, se sabrá a qué distancia está el blanco. La implementación de este banco de filtros se puede realizar de forma muy eficiente, muestreando la señal y realizando una transformada discreta de *Fourier* (DFT) de n puntos sobre ella.

Es sabido que cualquier señal de energía finita tiene transformada de Fourier. Si se recibiese la señal de batido de un blanco durante infinito tiempo, su transformada de Fourier sería una delta espectral de anchura cero. Sin embargo, cada señal de batido se recibe solamente durante un tiempo T (suponiendo $T \gg \Delta t$), periodo que dura la emisión y recepción de cada rampa. Esto equivale a un enventanado de la señal de batido con una ventana rectangular de duración T. La transformada de Fourier de la ventana rectangular es la conocida señal sinc, ecuación 7.

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \Leftrightarrow \text{sinc}(f) = \frac{\text{sen}(\pi T f)}{\pi f} \quad \text{Ecuación 7}$$

Al realizar la transformada de Fourier de la señal enventanada y apelando a la propiedad de modulación de dicha transformada, cada delta del espectro, teóricamente de anchura cero, pasa a convertirse en una sinc con un lóbulo principal de anchura $2/T$. El ancho del lóbulo principal de la sinc a 3 dB del máximo es aproximadamente $1/T$. Haciendo uso de la expresión de la ecuación 6, se demuestra que la resolución en distancia del sistema a 3 dB es inversamente proporcional al ancho de banda transmitido:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \rightarrow \Delta r = \frac{c}{2B} \quad \text{Ecuación 8}$$

8

Se define resolución de un radar a la separación mínima que deben tener dos blancos, con el mismo nivel de potencia reflejada, para poder ser discriminados correctamente por el radar.

El beneficio de utilizar una modulación en frecuencia es que se puede obtener una resolución en distancia equivalente a la conseguida utilizando pulsos muy cortos, con la ventaja de que la energía de la señal es la de un pulso largo. A esta técnica se la conoce como compresión de pulsos. (12)

A partir de la obtención de la frecuencia de batido mostrada en la Ecuación 6, es inmediata la obtención de la distancia al blanco, como se expresa en la Ecuación 9.

$$R = \frac{c * T * f_b}{2 * BW} \quad \text{Ecuación 9}$$

9

Es por tanto necesario implementar algún sistema de medida de frecuencia a la salida del mezclador para poder determinar la distancia al blanco, así como la velocidad de éste. Dependiendo del rango de frecuencias para el que esté

diseñado el radar se utilizan diferentes sistemas. Tradicionalmente, estos radares tenían un sistema de detección basado en un banco de filtros que cubrían el ancho de banda de interés. El ancho de banda de paso de estos filtros condiciona la resolución que se puede alcanzar. Hoy en día, se siguen utilizando para aplicaciones de muy alta frecuencia, donde la velocidad de muestreo del conversor analógico-digital complica la utilización de técnicas digitales.

Sin embargo, las aplicaciones más modernas, implementan una técnica digital de procesado. Esta técnica está basada en la aplicación de una transformada rápida de Fourier FFT a la señal de salida del mezclador, previamente filtrada para procesar solo el rango de frecuencias de interés. No debemos olvidar que en el radar FMCW existe una relación directa entre frecuencias y distancias, y que, por lo tanto, limitando el rango de frecuencias a procesar limitamos el rango de distancias. Esto permite muestrear la señal a velocidades más bajas y facilita la realización de la FFT.

El procesado digital permite la aplicación de técnicas MTI y MTD(20), pudiéndose separar la componente de velocidad de la señal a la salida del mezclador, incluso utilizando barridos de frecuencia en forma de diente de sierra. Tras la cancelación y subsiguiente obtención de los rangos de distancia, se puede lograr un procesado MTD sin más que hacer pasar la salida de cada una de las celdas de distancia por un nuevo banco de filtros implementado con una FFT (21).

El proceso de mezclar la señal recibida con una muestra de la transmitida y posteriormente filtrarla mediante una FFT, es equivalente a realizar una operación de filtrado adaptado, ya que en ambos casos se obtiene el mismo ancho de banda equivalente de ruido, que es igual al inverso de la duración del pulso, T_p . Es decir, la FFT tiene el efecto de realizar un filtrado con un ancho de banda igual al inverso del tiempo de integración coherente. Además, es posible utilizar un receptor I/Q para poder procesar muestras complejas y así aumentar el rango de frecuencias medidas. Este proceso es de fácil realización ya que las salidas I y Q del mezclador en cuadratura del receptor son de banda muy estrecha comparada con la banda transmitida por el radar y se pueden, por lo tanto, utilizar convertidores A/D de relativa baja velocidad. (22)

5.3.3.3. Tipos de señales moduladoras para radar FMCW

En los radares FMCW se utilizan fundamentalmente dos tipos de señales moduladoras: la señal en diente de sierra y la señal triangular. A continuación, se exponen sus principales características. (23)

5.3.3.3.1. Modulación en diente de sierra.

El valor de la frecuencia de batido será siempre el producto de la pendiente de la señal *chirp* por el retardo de la señal recibida debido a la posición del blanco.

Si la señal moduladora es un diente de sierra (señal *chirp* solo con pendiente positiva) entonces la pendiente tendrá un valor de BW/T y la frecuencia de batido vendrá dada por:

$$f_b = \frac{BW \cdot 2R}{T \cdot c} \quad \text{Ecuación}$$

10

Si el blanco tiene movimiento radial respecto al radar, además se producirá una variación en la frecuencia recibida por efecto *Doppler*, f_d , de valor:

$$f_d = + \frac{2 \cdot v_r \cdot f_0}{c} \quad \text{Ecuación}$$

11

donde f_0 es la frecuencia nominal del radar y v_r es la velocidad radial del blanco, utilizándose el signo positivo cuando el blanco se acerca, y el negativo cuando se aleja. Este desplazamiento *Doppler* puede hacer cambiar la posición de la frecuencia de batido a una celda de distancia distinta, y así empeorar la precisión en la medida de la distancia. Lo anterior, no tiene un efecto negativo sobre la resolución, siempre y cuando la velocidad a la que se mueva el blanco sea constante, en caso contrario, se produce un ensanchamiento del espectro y una pérdida de resolución. Para este tipo de blancos, blancos móviles, con modulación en diente de sierra, la frecuencia de batido completa vendrá dada por:

$$f_b = \frac{BW \cdot 2R}{T \cdot c} - f_d = \frac{BW \cdot 2R}{T \cdot c} \pm \frac{2 \cdot v_r \cdot f_0}{c} \quad \text{Ecuación}$$

12

Donde, como se puede observar, la frecuencia de batido depende de la distancia y de la velocidad. Para conseguir separar ambas dependencias se ha de modificar la forma de onda moduladora, la elección más frecuente es utilizar una señal moduladora de forma triangular.

5.3.3.3.2. Modulación Triangular:

La frecuencia de batido para este tipo de señal moduladora vendrá dada por:

$$f_b = \frac{BW \cdot 4R}{T \cdot c} \quad \text{Ecuación}$$

13

Si el blanco está en movimiento tendremos dos frecuencias de batido distintas, una para el barrido ascendente y otra para el descendente:

$$f_{b_ascendente} = \frac{BW*4R}{T*c} \pm \frac{2*v_r*f_0}{c} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$f_{b_descendente} = -\frac{BW*4R}{T*c} \pm \frac{2*v_r*f_0}{c} \quad \text{Ecuación 15}$$

Por lo tanto, la distancia será directamente proporcional a la diferencia de las dos frecuencias:

$$R = \frac{T*c}{8*BW} (f_{b_ascendente} - f_{b_descendente}) \quad \text{Ecuación 16}$$

Sin embargo, y pese a que con este tipo de modulación es posible separar las contribuciones a la frecuencia de batido de las componentes de distancia y velocidad, se suele preferir implementar señales moduladoras en diente de sierra. La razón de ello es que simplifica la implementación de funciones tales como la agilidad en frecuencia y su mejora asociada en detección. De esta manera, y siempre que la velocidad de los blancos no sea muy alta, frecuencias *Doppler* de valor inferior a una o pocas celdas de resolución, es preferible utilizar la modulación en diente de sierra. En este trabajo de pasantía se implementó un sistema con una modulación en diente de sierra, permitiendo de esta manera agilidad en frecuencia.

En la Figura 11 se pueden apreciar los dos tipos de señales moduladoras lineales FMCW descritas anteriormente. En el apartado A se muestra la señal *chirp* producida por una modulación diente de sierra mostrada en el apartado B; en el apartado C se muestra la señal *chirp* producida por una modulación triangular mostrada en el apartado D.

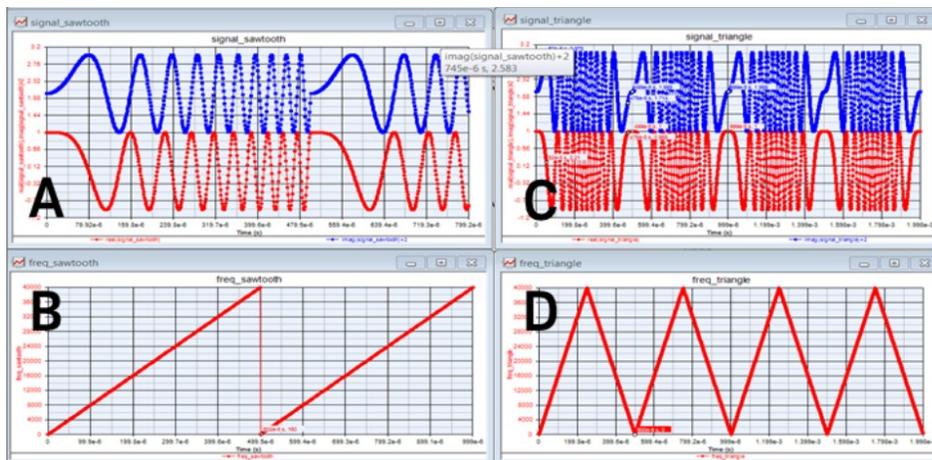


Figura 11. Señales típicas lineales FMCW

Fuente: Keysight EEsof EDA (24)

5.3.5. Radar Móvil

Los sistemas de radares móviles se están empleando cada vez más con el transcurso del tiempo. En la industria automotriz, el radar para automóviles basado en FMCW es una tecnología que se usa ampliamente en la actualidad debido a que los sistemas de radares basados en esta tecnología ofrecen más ventajas, como un buen rendimiento con componentes sencillos de RF, tamaño pequeño, peso ligero y bajo costo. (24)

Los vehículos cada vez más se acercan al autoconducción. Los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS, por su acrónimo en inglés) usan diferentes tecnologías, entre ellas radar, para maniobrar en las calles a través de peatones y otros vehículos.

En los últimos años, los vehículos últimos modelos, se han estado moviendo constantemente hacia el uso de la automatización para pilotear el vehículo sin ayuda del conductor. El objetivo de diseñar un vehículo ADAS totalmente autónomo es crear un automóvil que se pueda dejar para manejar un tramo considerable de distancia en carretera, como en una carretera interestatal, mientras que el conductor humano queda libre para prestar atención casualmente a la ruta o incluso ignorar el pilotaje del vehículo mientras se atiende a otras tareas.

La tecnología de radar se utiliza ampliamente en la mayoría de los vehículos autónomos automatizados, con equipos ADAS que incorporan transmisores de radar y sensores para radares de largo alcance (LR), medio alcance (MR), de corto alcance (SR) y ultracorto alcance. Los sistemas de radar funcionan en anchos de banda disponibles en frecuencias centimétricas y milimétricas a 24 GHz y 76 a 81 GHz, respectivamente. (25) En la Figura 12. Rango de radares en un automóvil con ADAS se muestra el rango de los radares de corto y largo alcance empleados en automóviles con ADAS.

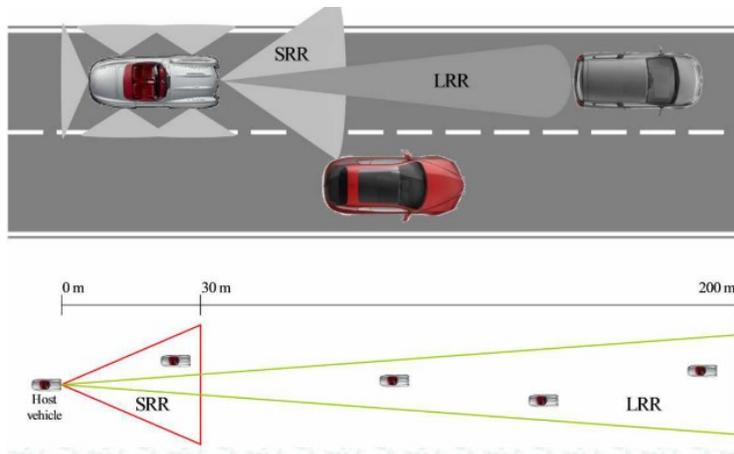


Figura 12. Rango de radares en un automóvil con ADAS

Fuente: Automotive Radar (26)

Un ejemplo de dos módulos de sistema ADAS se muestra en la Figura 13, en la parte izquierda se puede observar un sistema con un radar que opera a 77GHz y en la parte de atrás del sistema (imagen a la derecha) se aprecia el acondicionamiento para la cámara. (25)



Figura 13. Ejemplo de dos módulos de un ADAS, Radar (Izquierda), Cámara (derecha)

Fuente: mmWave Design Plays a Driving Role in ADAS (25)

Dentro del campo civil, en el año 2017, el Centro de Investigación Técnica (VTT, por sus siglas en finés) de Finlandia ha desarrollado un dispositivo radar de guía para personas con discapacidad visual, que está diseñado para proporcionar seguridad adicional para el movimiento. El dispositivo le indica al usuario con una vibración o un pitido sobre un radio de unos cinco metros que un obstáculo podría golpearlo. Sin embargo, la detección de ramas delgadas todavía es difícil para el radar, admiten los autores del dispositivo; por esta razón, se esperan mejoras en el próximo prototipo. (27)



Figura 14. Prototipo de radar de guía para personas con discapacidad visual

Fuente: Yleisradio (27)

5.3.6. Componentes de Radiofrecuencia

5.3.6.1. VCO

El componente clave de un sistema de radar FMCW es el oscilador controlado por voltaje (VCO), ya que actúa como la fuente de señal del radar. El VCO es un oscilador electrónico cuya frecuencia de oscilación puede ser controlado por un voltaje de entrada. Teóricamente la frecuencia de salida se puede escribir de la siguiente forma:

$$f_0(t) = K_0 * V_{in}(t) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde la modulación de frecuencia puede ser controlada con la modulación de $V_{in}(t)$. Para lograr un buen rendimiento de un sistema de radar FMCW se necesita que la señal *chirp* sea totalmente lineal en frecuencia, sin embargo, el componente que se encarga de generar este chirp o señal modulada en frecuencia que es el VCO utiliza un convertidor exponencial y es extremadamente sensible a la temperatura por lo cual su respuesta de frecuencia no será totalmente lineal. Para solucionar este inconveniente, la señal *chirp* se genera mediante una tarjeta de desarrollo que incorpora FPGA.

5.3.6.2. Amplificador de bajo ruido, LNA.

Es un tipo especial de amplificador electrónico usado para amplificar señales muy débiles provenientes, por ejemplo, de una antena receptora. Su propósito principal es proporcionar una figura de ruido mínima, aunque ello conlleve a una disminución considerable de la ganancia.

En sistemas de recepción es usualmente requerido tener un preamplificador con una figura de ruido lo más reducido posible, debido a que la primera etapa del

circuito tendrá el efecto dominante sobre la performance de ruido en todo el sistema. (28)

5.3.6.3. Mezclador

Un mezclador o *mixer* es un dispositivo de tres puertos que usa un elemento no lineal o variante en el tiempo para poder lograr la conversión. El símbolo y el diagrama funcional del *mixer* están ilustrados en la Figura 15. El símbolo del mixer quiere decir que la salida es proporcional al producto de dos señales de entrada que consiste en la suma y diferencia de sus frecuencias. Esto es una idealización de la operación del *mixer*, ya que en realidad se produce una gran variedad de armónicos y otros productos no deseados a partir de las señales de entrada. En la figura 15a se muestra la operación de conversión a alta frecuencia. El oscilador local (LO) a una frecuencia relativamente alta f_{LO} es conectada a una de las entradas del *mixer*. La señal del oscilador local puede ser representado como:

$$V_{LO}(t) = \cos(2\pi * f_{LO} * t) \quad \text{Ecuación 18}$$

Una frecuencia en banda base o una frecuencia intermedia (IF) es aplicada a la otra entrada del mixer. Típicamente esta señal contiene la información o data a ser transmitida, y puede ser representada como:

$$V_{IF}(t) = \cos(2\pi * f_{IF} * t) \quad \text{Ecuación 19}$$

La señal de salida de un mixer ideal está dada por el producto de las señales LO e IF.

$$\begin{aligned} V_{RF}(t) &= K * V_{LO}(t) * V_{IF}(t) = K(\cos(2\pi * f_{LO} * t))(\cos(2\pi * f_{IF} * t)) \\ &= \frac{K}{2} [(\cos(2\pi * (f_{LO} - f_{IF})t)) + (\cos(2\pi * (f_{LO} + f_{IF})t))] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde K es una constante que representa la pérdida por conversión del mixer. La salida RF consiste en la suma y diferencia de las frecuencias de las señales de entrada:

$$f_{RF} = f_{LO} \pm f_{IF} \quad \text{Ecuación 21}$$

El espectro de frecuencia de las señales de entrada y salida son mostradas en la Figura 15a, donde se ve que el mixer tiene el efecto de modulación de la señal LO con la señal IF. La suma y diferencia de frecuencia son llamadas bandas laterales de la portadora f_{LO} , con $f_{LO} + f_{IF}$ siendo la banda lateral superior (USB) y $f_{LO} - f_{IF}$ siendo la banda lateral inferior (LSB).

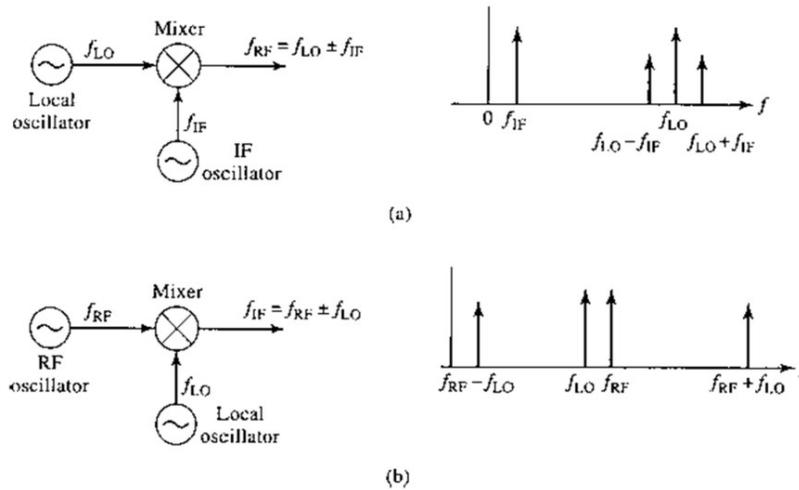


Figura 15. Conversión de frecuencias usando un mixer

Fuente: Microwave Engineering (29)

Por el contrario, la Figura 15b muestra el proceso de conversión a baja frecuencia, como es usado en un receptor. En este caso la señal RF es la entrada y tiene la forma:

$$V_{RF}(t) = \cos(2\pi * f_{RF} * t) \quad \text{Ecuación 22}$$

Entonces la señal de salida del mixer tendrá la forma de:

$$\begin{aligned} V_{IF}(t) &= K * V_{RF}(t) * V_{LO}(t) = K(\cos(2\pi * f_{RF} * t))(\cos(2\pi * f_{LO} * t)) \\ &= \frac{K}{2} [(\cos(2\pi * (f_{RF} - f_{LO})t)) + (\cos(2\pi * (f_{RF} + f_{LO})t))] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 23}$$

En la práctica las frecuencias de RF y LO son muy cercanas por lo que la suma de frecuencias es aproximadamente igual a dos veces la frecuencia de RF, mientras que la diferencia es mucho menor que f_{RF} . La salida IF deseada en el receptor es la diferencia de frecuencia $f_{RF} - f_{LO}$ que es seleccionada fácilmente con un filtro pasa bajos:

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO} \quad \text{Ecuación 24}$$

Estos resultados son válidos considerando que el mixer es ideal, sin embargo, un mixer en realidad tiene más productos generados por el comportamiento no lineal del diodo o transistor que lo compone. Estos productos son usualmente indeseados y eliminados usando filtros. (13)

5.3.7. Aspectos para tener en cuenta en la detección radar

Dentro del marco del proyecto se tuvieron en cuenta algunos de los aspectos para tener en cuenta en la detección radar que a continuación, se presentan.

5.3.7.1. Clutter

El *clutter* es un ruido provocado por los ecos o reflexiones en elementos ajenos al sistema, que reducen sensiblemente la relación señal/ruido y, por lo tanto, evitan que la detección de los blancos deseados sea óptima. En la Figura 16, se muestra un entorno real en el que un radar montado sobre un barco encontrará diversos elementos que producirán un eco indeseado.

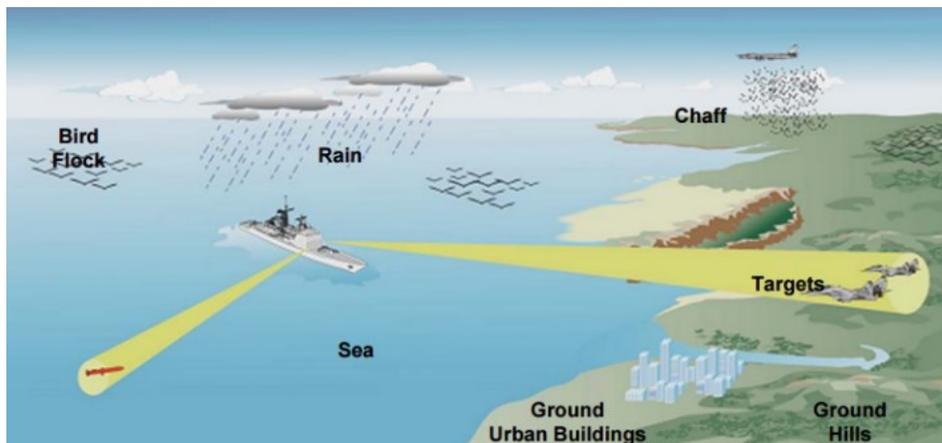


Figura 16. Entorno real con clutter

Fuente: Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático (31)

5.3.7.2. Sección transversal de un radar RCS

La sección equivalente de radar, o RCS por sus siglas en inglés (Radar Cross-Section), es una medida de cuán detectable es un objeto mediante radar. Una RCS mayor indica que un objeto es más fácil de detectar. Cuando las ondas de radar se transmiten sobre un blanco, sólo una cierta cantidad de energía es reflejada de vuelta. La definición que marca el standard de IEEE para la RCS es:

$$\sigma = 4\pi \frac{P_s}{\Omega P_i} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde P_s (*watts*) es la potencia dispersada en una dirección específica. Ω (steradianes) es el ángulo sólido sobre el que la potencia es dispersada. P_i es la densidad de potencia ($\frac{\text{watts}}{\text{m}^2}$) de la onda plana en el blanco.

Algunos de los factores que influyen en el valor del RCS son:

- El material del que está hecho el blanco.
- El tamaño absoluto del blanco.
- El tamaño relativo del blanco (en relación con la longitud de onda del radar).
- El ángulo de incidencia (ángulo con que las ondas de radar llegan a cada punto de la superficie del blanco, el cual depende de la forma del blanco y su orientación respecto a la fuente del radar).
- El ángulo reflejado (ángulo con el que la onda reflejada sale del blanco, que a su vez depende del ángulo de incidencia).
- Potencia de la señal del radar emisor.
- Distancia entre el radar y el blanco. (30)

La RCS puede ser calculada matemáticamente si el blanco tiene características similares a una figura geométrica simple, en la Figura 17 se muestran las fórmulas para calcular la RCS de este tipo de blancos.

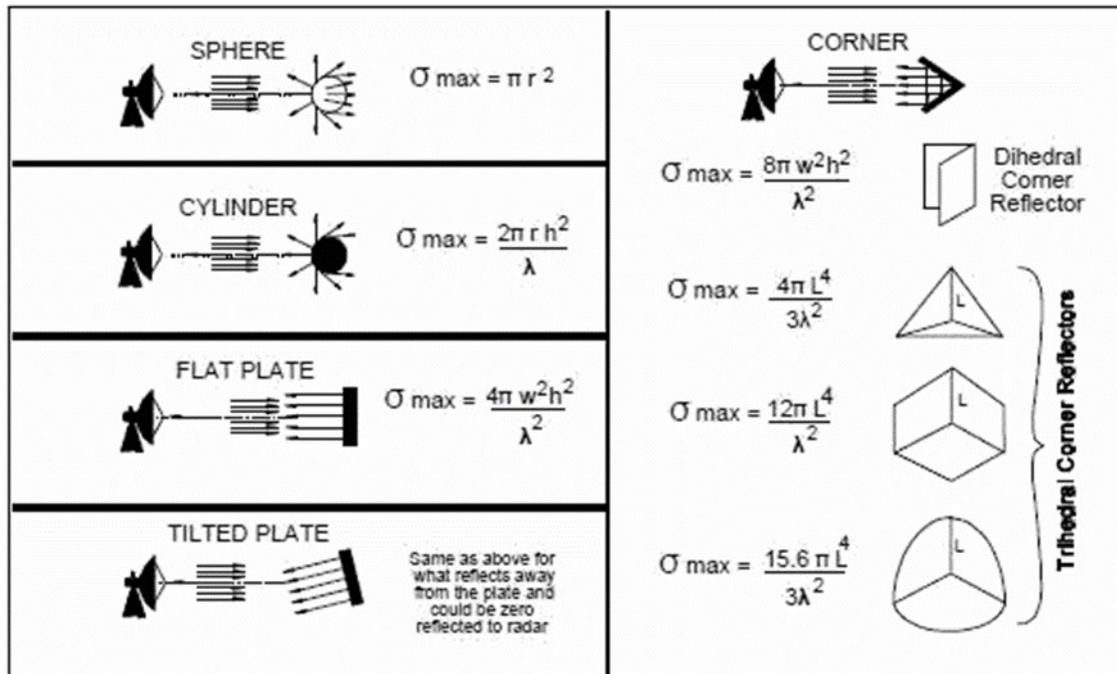


Figura 17. Fórmulas para el cálculo de la RCS de figuras geométricas simples

Fuente: *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook* (31)

En caso de que el blanco no cumpla con dichas características, no es posible definir un valor exacto RCS objetos reales porque la reflectividad depende de muchos parámetros. Sin embargo, la RCS puede ser tentativamente medida en laboratorios de radiofrecuencia, esta depende de la frecuencia de operación del radar. En la Tabla 3 se muestra la medida de RCS en la frecuencia de 24 GHz (banda K) para diferentes tipos de blancos.

Tabla 3. Valores de RCS típicos a 24GHz(16)

Tipo de blanco	RCS
Ser humano	0.5 - 1 m ²
Árbol	> 1 m ²
Automóvil	10 m ²
Placa metálica de 1m ²	> 100 m ²
Barco	> 1000 m ²

En otras palabras, un ser humano es un objetivo de radar bastante malo en comparación con una pieza de metal o con un automóvil.

5.3.7.3. Probabilidad de detección y tasa de falsa alarma

En el proceso de evaluación de sensores de detección radar, hay al menos dos características de rendimiento que deben considerarse: Probabilidad de detección (PD), Tasa de alarma falsa (FAR, por sus siglas en inglés).

La probabilidad de detección proporciona una indicación del rendimiento del sensor al detectar movimiento dentro de una zona cubierta por el mismo. La probabilidad de detección implica no solo las características del sensor, sino también el entorno, el método de instalación y ajuste, y el comportamiento asumido de un blanco.

La tasa de falsa alarma indica la tasa esperada de aparición de alarmas que no son atribuibles a la actividad de detección de un blanco. Una falsa alarma es una alarma cuando se desconoce la causa y, por lo tanto, es posible la detección de un blanco, pero una determinación después del hecho indica que no hubo tal detección. (32)

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

En esta sección se explica el diseño e implementación de cada una de las etapas del proyecto. La idea principal de este proyecto consiste en la validación del funcionamiento de un sensor radar L-FMCW sobre una plataforma móvil para detección de obstáculos. Para ello se deben generar, acondicionar y adquirir las señales digitales en una tarjeta de desarrollo; luego de esto, se debe hacer la transmisión de los datos por vía inalámbrica para realizar el procesamiento radar y poder visualizarlos en el computador. En la Figura 18 se muestra una imagen alusiva al concepto general del proyecto.

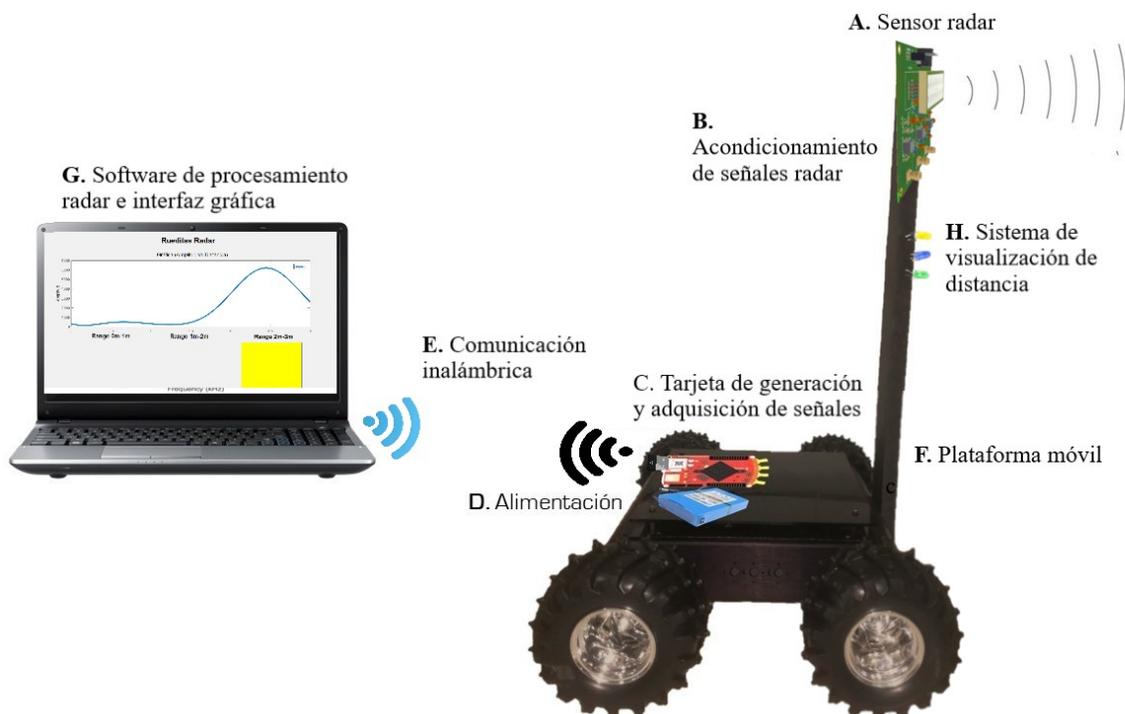


Figura 18. Diseño planteado para el sistema radar móvil

Fuente: Propia

La integración de cada uno de los bloques de función de hardware y software es de vital importancia para realizar la validación del sensor radar y así dar un estimado de la distancia entre el sensor radar y los obstáculos.

6.1. HARDWARE

Para la implementación del hardware se realizó un esquema general que sirve como punto de partida para la especificación de requisitos. Un diagrama de bloques del sistema radar se muestra en la Figura 19.

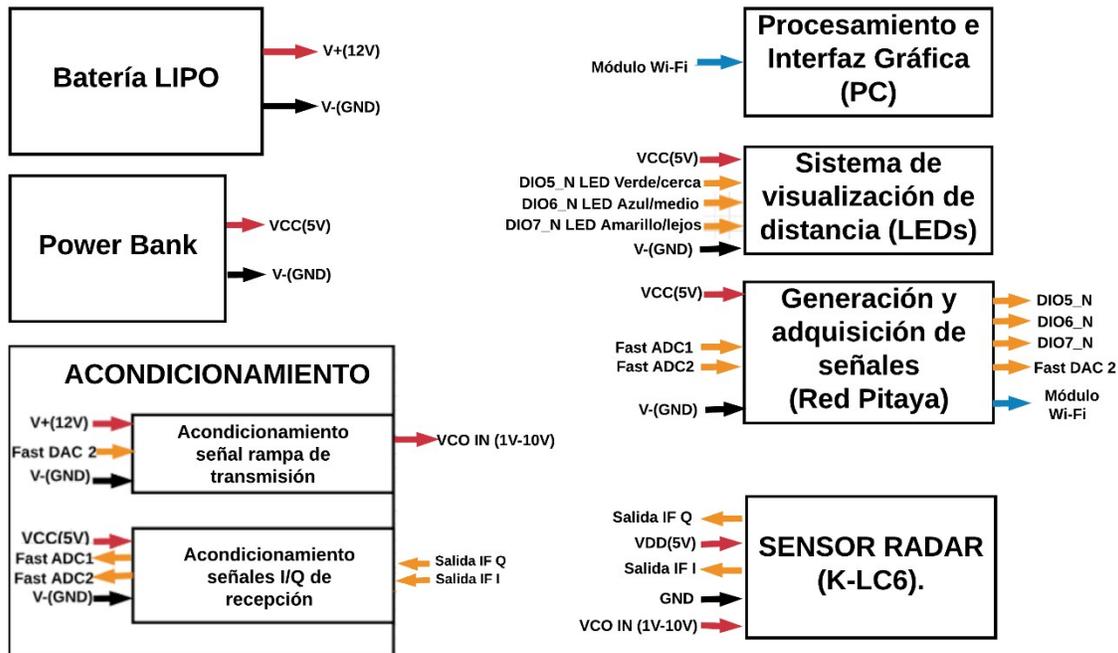


Figura 19. Diagrama de bloques del sistema radar

Fuente: Propia

El hardware tendrá que cumplir con una serie de requisitos descritos a continuación:

- La tarjeta de generación y adquisición de señales será la STEMLab Red Pitaya, que generará la señal a ser transmitida por el sensor K-LC6, recibiendo las señales de este sensor para enviarlas a través de un módulo Wi-Fi a un computador para realizar el procesamiento radar de las señales y obtener información de distancia.
- El hardware tendrá una interfaz gráfica de usuario para presentar las medidas actuales de distancia, mediante la comunicación inalámbrica a una computadora personal.
- El circuito implementará las conexiones y el espacio necesarios para instalar el sensor K-LC6.
- Se emplearán los convertidores analógicos digitales (ADC) y los convertidores digitales analógicos (DAC) rápidos de STEMLab Red Pitaya, debido a

que ofrecen frecuencias de muestreo mayores en comparación que con los lentos.

- El circuito tendrá un bloque de señal de acondicionamiento que se divide en dos subcircuitos: acondicionamiento de la señal rampa de transmisión y acondicionamiento de las señales I/Q recibidas. El acondicionamiento de la señal transmitida establecerá el nivel y la amplitud de la señal generada por el DAC rápido de STEMLab Red Pitaya con las magnitudes necesarias para el sensor de radar K-LC6: entre 1 y 10 V. El acondicionamiento de las señales I/Q recibidas amplificarán dichas señales del K-LC6 para adaptarlas entre 0 y 5 V; estas señales serán recibidas por los ADC rápidos de la tarjeta.
- El diseño considerará el aislamiento correcto entre señales analógicas y digitales para evitar interferencias entre sí.
- El circuito se alimentará con baterías para evitar el ruido proveniente de la red eléctrica.
- Se contará con un sistema de visualización de distancia físico, el cual incluirá 3 diodos LED de diferentes colores, a cada diodo LED se le asignará un rango de distancia: Baja, Media, Alta.

6.1.1. Sensor Radar transceptor K-LC6

Recientemente, la miniaturización continua de los dispositivos electrónicos y, por lo tanto, su capacidad de integración en pequeños módulos, resulta en el desarrollo de sistemas compactos de aplicaciones específicas y de bajo costo relativo, como en este caso el módulo transceptor K-LC6. Este módulo, con la integración de hardware y software adecuada, puede funcionar como un radar de corto alcance para aplicaciones industriales y civiles. (33)

El K-LC6 es un radar Doppler de doble canal con un haz estrecho asimétrico para sensores de corta a media distancia. Está diseñado para detectar presencia y movimiento de personas y vehículos.

Este módulo incluye un amplificador de bajo ruido (LNA) de radiofrecuencia para mejorar la relación señal a ruido. Las salidas de I y Q de IF permiten la detección de la dirección del movimiento y el procesamiento de señales de alto rendimiento. El K-LC6 tiene las siguientes características generales: (34)

Tabla 4. Características generales y posibles aplicaciones del K-LC6(34)

Características generales	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> - Transceptor corto alcance a 24GHz - Ancho de haz asimétrico a través patrón de radiación - Apertura de haz 80°/12° - Receptor LNA de alta sensibilidad - Ancho de banda de 250MHz con entrada FM - Salidas I/Q de IF - Tamaño compacto: 66mm x 25mm x 6mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicaciones de control de luces afuera o adentro. - Conteo y supervisión de tráfico - Sistemas de medición de velocidad - Detección de presencia y distancia - Sensores industriales

La Figura 20 muestra el diagrama de bloques del módulo y el sistema de antenas de transmisión y recepción para el sensor transceptor K-LC6.

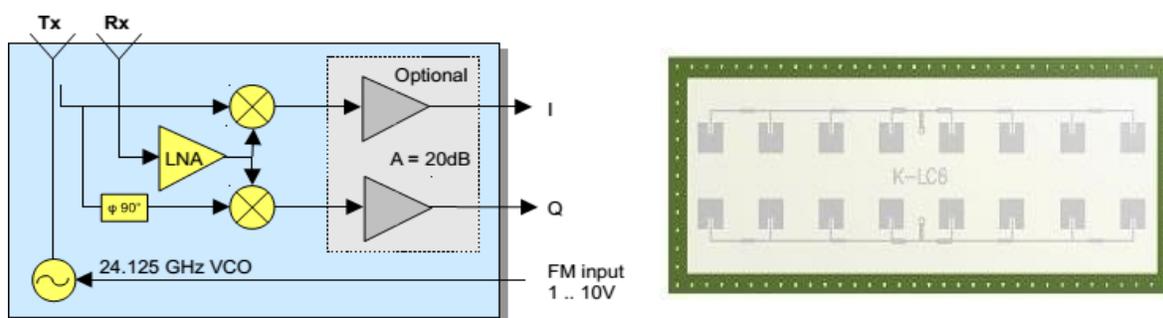


Figura 20. Diagrama de bloques y sistema de antenas del K-LC6

Fuente: RFbeam Microwave GmbH 2012 (34)

Como se evidencia en la Figura 20, el amplificador IF proporciona dos salidas I/Q en el canal de recepción. Estas salidas están diseñadas para diferentes requisitos en el procesamiento de señales de radar. Se puede utilizar cualquiera de las señales I (en fase) y Q (cuadratura) para obtener la información de la frecuencia de batido, o bien, realizar una suma compleja considerando $I + jQ$. Las señales I y Q cambian de fase en $+90^\circ$ o -90° , dependiendo si el objeto se acerca o se aleja del radar.

Las principales características de este módulo son:

Tabla 5. Parámetros del K-LC6(34)

No.	Parámetro	Valor			Unidad	Notas
		Min	Tip.	Máx		
1.	Voltaje de alimentación	4.75	5	5.25	V	
2.	Corriente de alimentación		50	70	mA	
3.	Voltaje de entrada del VCO	1		10	V	
4.	Frecuencia de transmisión	24.050	24.150	24.250	GHz	UVCO=5V
5.	Ancho de haz Horizontal - 3dB		12			°

No.	Parámetro	Valor	Unidad	Notas
6.	Ancho de haz Vertical -3dB b	80		

Se debe tener en cuenta que el radar FMCW genera una señal de salida incluso sin un objeto dentro del alcance debido al aislamiento finito entre la trayectoria entre el transmisor y el receptor. Este efecto se denomina auto-mezcla y conduce a una señal DC que depende de la frecuencia portadora. Al usar FMCW, estas señales se mueven y pueden llegar a saturar los amplificadores IF externos en ciertas circunstancias.

Las salidas IF proporcionan un alto ancho de banda para su uso en aplicaciones FMCW y FSK. Deben utilizarse filtros externos para reducir el ancho de banda según la aplicación. Cuanto menor sea el ancho de banda, mejor será la relación señal / ruido (SNR). La amplificación externa debe limitarse para evitar la saturación. Con un barrido FMCW completo, las salidas de IF tendrán una alimentación aproximada de 20 mVpp. En la Figura 21, se muestra el patrón de radiación en las direcciones de Azimut (rojo) y elevación (azul). El patrón en Azimut es más directivo (12°) debido a que horizontalmente tiene 8 antenas, mientras que en elevación es mucho más disperso (80°) porque verticalmente solo se cuenta con una antena.

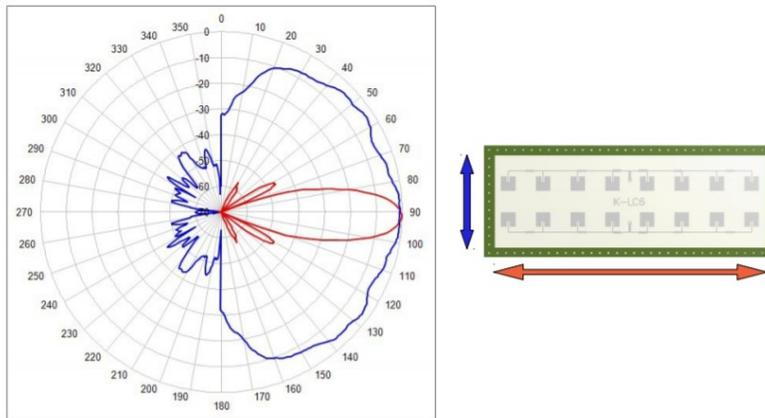


Figura 21. Diagrama de radiación para el K-LC6

Fuente: RFbeam Microwave GmbH 2012 (34)

La frecuencia de la portadora puede ser modulada por medio de un voltaje aplicado en la entrada del VCO (Oscilador controlado por voltaje, por sus siglas en inglés). Esta función puede ser empleada para determina distancias y se utilizan FMCW o técnicas FSK. La rampa que alimenta el VCO debe tener una muy buena linealidad. En la Figura 22 se muestra la función lineal que representa los valores típicos de frecuencia vs voltaje VCO para el sensor K-LC6.

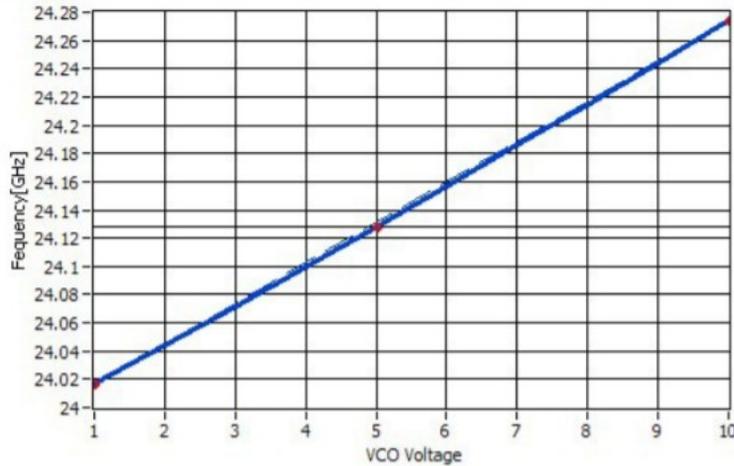


Figura 22. Gráfica de Frecuencia VS Voltaje VCO del K-LC6.

Fuente: RFbeam Microwave GmbH 2012 (34)

La configuración de pines para el sensor radar K-LC6 se muestra en la Tabla 6

Tabla 6. Configuración de pines para el K-LC6.

Pin	Descripción	Valor
1	Salida IF Q	
2	VCC	5V
3	Salida IF I	
4	GND	0V
5	Entrada VCO	1V – 10V, (Sin conectar) = 5V

Según la hoja de especificaciones del sensor, el alcance máximo depende en cierta parte de la RCS del objeto. Las variaciones RCS sin embargo influyen en el alcance máximo sólo por: $\sqrt[4]{\sigma}$

El alcance máximo depende principalmente de:

- Sensibilidad del módulo S: -126dBc (ancho de banda IF de 1kHz)
- Frecuencia portadora f_0 : 24.125GHz
- RCS “reflectividad” del objeto σ : $1 m^2$ aprox. para una persona en movimiento;
 $50 m^2$ para un coche en movimiento.

La ecuación de radar para el módulo K-LC6 se puede reducir a la siguiente relación:

$$r = 0.0167 * 10^{\frac{-S}{40}} * \sqrt[4]{\sigma}$$

Ecuación 26

Con $G_{antenna} = 0dBi$

Y figura de ruido = 30dB

Usando esta fórmula, se obtiene un alcance máximo de:

- 24m para una persona en movimiento
- 62m para un coche en movimiento

Los valores de rango también dependen en gran medida del rendimiento del procesamiento de la señal, las condiciones ambientales (es decir, la lluvia, la niebla), la carcasa del módulo y otros factores.

6.1.2. STEMLab Red Pitaya

La STEMLab Red Pitaya es un computador de bolsillo, un sistema electrónico de código abierto para aplicaciones de control y medición, con el tamaño de una tarjeta de crédito. Tiene similitudes con sistemas como Raspberry Pi, con un sistema operativo basado en Linux y una comunidad de usuarios que desarrollan y comparten sus aplicaciones. Sin embargo, STEMLab Red Pitaya tiene dos factores diferenciales:

- Hardware dedicado para la adquisición y generación de señales analógicas
- CPU con una FPGA programable para realizar tareas de procesamiento digital de señales.

Debido a sus capacidades hardware y software, la Red Pitaya puede reemplazar algunos elementos de laboratorio. Los usuarios pueden encontrar diversas funcionalidades disponibles en un bazar de aplicaciones, tales como osciloscopio, generador de funciones, analizador de espectros, LCR entre otros. Debido a que la tarjeta no trae una interfaz gráfica ni puertos de video, estos elementos de laboratorio están programados sobre una plataforma web, a la que el sistema envía la información para poder visualizarla en un ordenador conectado a la misma red local. Las aplicaciones que trae preinstaladas son funcionales y bastante útiles, con la tarjeta se pueden desarrollar proyectos propios.

A la hora del procesamiento de una señal radar es importante contar con un ADC Y un DAC de altas resoluciones para minimizar el error al retorno de la señal radar, la tarjeta cuenta hasta con 14 Bits de resolución para estos convertidores. Otro factor influyente es la velocidad del procesamiento de los datos, dado a que la tarjeta trabaja también con FPGA, es posible operar las interfaces seriales y paralelas al mismo tiempo que se realiza el procesamiento de la señal radar, para trabajo en tiempo real. Por último, la tarjeta cuenta con una memoria hasta de 32 GB, por lo cual por espacio no habrá problemas y con 512 MB de RAM, por lo cual a la hora de realizar el procesamiento de las señales no se quedará corta (35). En la Figura 23 se muestra una imagen de la tarjeta descrita.



Figura 23. Tarjeta STEMLab Red Pitaya

Fuente: Red Pitaya (36)

La STEMLab Red-Pitaya ofrece 2 tipos de ADC y 2 tipos de DAC:

- ADC rápido: contiene 14 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima de 125 Msps, 2 canales con conector tipo SMA, máximo valor de voltaje configurable hasta 20V.
- ADC lento: contiene 12 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima de 100 Ksps, 4 canales con conector tipo pin, máximo valor de voltaje 3.5V.
- DAC rápido: contiene 14 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima de 125 Msps, 2 canales con conector tipo SMA, puede generar señales con voltajes entre -1 Y 1 V.
- DAC lento: contiene 12 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima es de 100ksps, 4 canales con conector tipo pin, puede generar señales con voltajes entre 0 y 1.8 V. (36)

6.1.3. Diseño del circuito de acondicionamiento de las señales

El pin 5 *VCO IN* del sensor K-LC6 requiere de una señal moduladora acotada dentro de un rango de voltajes de 1V a 10 V, y los pines 1 y 3 entregan las señales I/Q que deben acondicionarse dentro de un margen de voltajes de 0V a 5V para procesarlas en la tarjeta. Por lo tanto, es necesario diseñar dos subcircuitos diferentes para acondicionar las señales transmitidas y recibidas.

6.1.3.1 Acondicionamiento de señal de transmisión

En primer lugar, se tiene que elegir el tipo de señal moduladora que requiere el VCO. Un criterio para elegir entre los dos tipos de modulación descritos en el marco teórico es la velocidad del objeto que se planea detectar. Si el movimiento es lento el cambio Doppler será despreciable y puede ser aproximado como estacionario, por lo que no habrá diferencias entre las formas de onda; si el

movimiento es rápido habrá un cambio Doppler significativo, por lo cual con la modulación triangular es posible separar las contribuciones entre la frecuencia de batido y la frecuencia Doppler y con esto realizar la detección más aproximada (37). En este caso el objeto permanece fijo, empero, la plataforma móvil tiene una velocidad constante. Dado a que la velocidad de la plataforma móvil es baja, el radar puede emplear la modulación en diente de sierra para simplificar la implementación de funciones tales como la agilidad en frecuencia y su mejora asociada en detección.

Luego de definir el tipo de señal moduladora se procede a realizar el acondicionamiento de la salida de voltaje del DAC de la tarjeta, dado a que se puede generar una señal diente de sierra de 0.1V a 1V y se requiere una señal diente de sierra de voltaje de 1V a 10V para suplir la entrada *VCO in* del sensor K-LC6.

Se hicieron pruebas con el DAC Lento (*Slow DAC*) de la tarjeta, el cual emplea 11 bits de resolución, pero no se obtuvieron los resultados deseados en frecuencia, debido a que el DAC lento trabaja con el procesador que también se encarga del sistema operativo de la tarjeta, por lo tanto, la velocidad del procesamiento se ve afectada. Para solucionar este inconveniente se empleó el DAC rápido (*Fast DAC*) de la tarjeta, que opera con la FPGA Zynq 7000 incorporada y ofrece una resolución de 14 bits con una salida de voltaje de -1 a 1V. Dado a que se requiere generar una rampa con la tarjeta entre 0.1 y 1V, teniendo en cuenta la resolución del DAC rápido, la cantidad de escalones por cada rampa es 2^{14} , es decir 16384 escalones por rampa. Se establece una frecuencia de 300 Hz para la señal rampa (PRF), la Figura 24 muestra la señal de transmisión empleada.

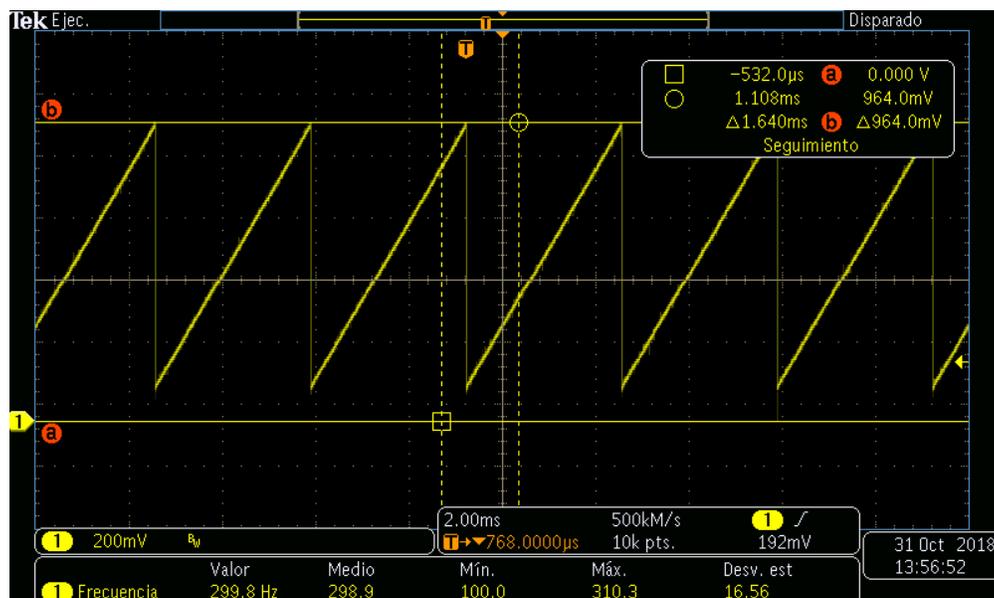


Figura 24. Señal de transmisión generada

Fuente: Propia

En la Figura 25 se muestra una gráfica más detallada de voltaje vs periodo de la señal generada por el DAC de la tarjeta.

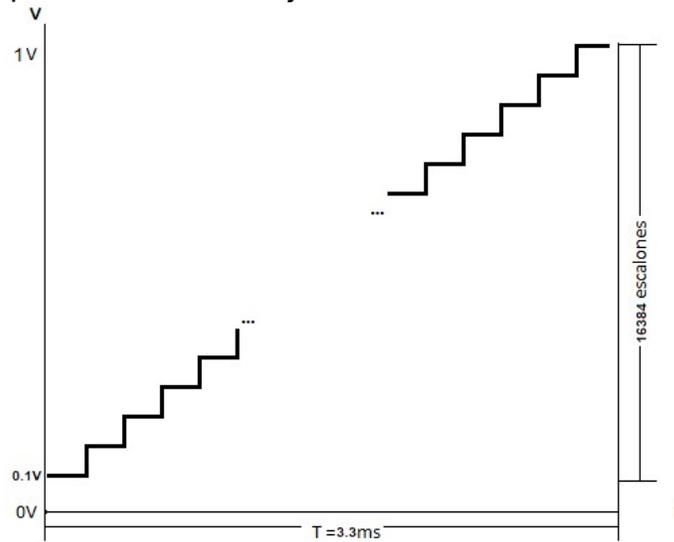


Figura 25. Gráfica de voltaje vs periodo de la señal generada por el DAC

Fuente: *a short-range, low-cost radar system development to measure speed and distance* (33)

Al establecer la PRF en 300 Hz, el período de la señal es:

$$T_{ram} = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{300 \text{ Hz}} = 3.33 \text{ ms} \quad \text{Ecuación 27}$$

Esto significa que el tiempo transcurrido entre cada escalón es:

$$T_{escalon} = \frac{3.3 \text{ ms}}{16384} = 203.4 \text{ ns} \quad \text{Ecuación 28}$$

De donde se obtiene la frecuencia de muestreo del DAC:

$$f_{SDAC} = \frac{1}{T_{escalon}} = \frac{1}{203.4 \text{ ns}} = 4.916 \text{ MHz} \quad \text{Ecuación 29}$$

Una rampa perfecta genera un espectro como el mostrado en la Figura 26:

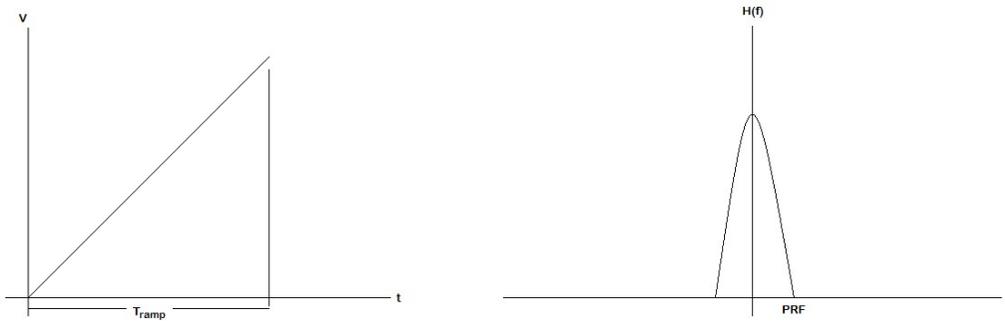


Figura 26. Respuesta en frecuencia de una rampa perfecta

Fuente: A short-range, low-cost radar system development to measure speed and distance (33)

Sin embargo, una rampa escalonada, generará un espectro similar pero que se repite cada intervalo de frecuencia de escalón:

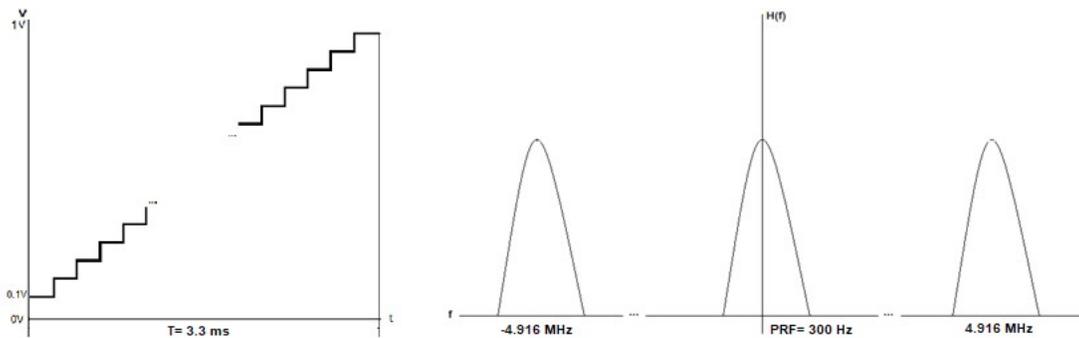


Figura 27. Respuesta en frecuencia de una rampa escalonada

Fuente: A short-range, low-cost radar system development to measure speed and distance (33)

Utilizando un filtro paso bajo, se pueden eliminar estas réplicas no deseadas de la señal. Para afectar la señal transmitida lo menos posible, se ha elegido una frecuencia de corte del filtro de 100 KHz. Si se elige un valor comercial de capacitancia de 100 pF, la resistencia que se requiere es:

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot f_L \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \text{ KHz} \cdot 100 \text{ pF}} = 15.9 \text{ K}\Omega \quad \text{Ecuación 30}$$

Utilizando el valor comercial de resistencia más cercano de 15 K Ω , la frecuencia de corte del filtro es:

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 15 \text{ K}\Omega \cdot 100 \text{ pF}} = 106.1 \text{ KHz} \quad \text{Ecuación 31}$$

Ya se tiene la frecuencia de corte del filtro. Ahora se requiere colocar la señal en los niveles deseados entre 1 y 10V. Para ello, y dado que el DAC rápido de Red Pitaya generó una rampa entre 0.1 y 1V, basta con amplificar la señal 10 veces

(20 dB), con lo cual se tendrá en la salida la señal de transmisión deseada que es una señal *chirp* de 1 a 10V con una PRF de 300 Hz.

El esquema del circuito utilizado para tal fin es el filtro no inversor pasa bajas con amplificador operacional de fuente única que aparece en la Figura 28. Nótese que aparece el amplificador operacional MC33202 (38) que tiene dos amplificadores en un mismo encapsulado, dejando por lo tanto uno de ellos disponible.

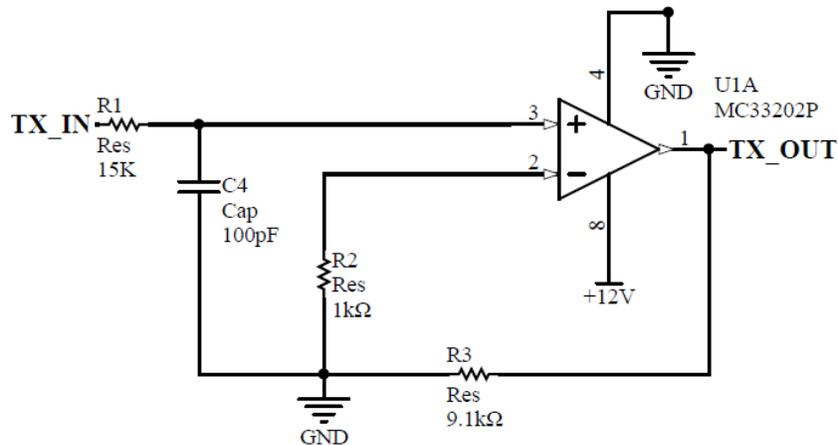


Figura 28. Circuito de acondicionamiento para la señal de transmisión

Fuente: Propia

La ganancia en el amplificador no inversor está dada por:

$$G = 1 + R3/R2 \quad \text{Ecuación 32}$$

Por lo tanto:

$$G = 1 + 9100/1000$$

$$G = 10.1$$

La señal de salida obtenida se muestra en la Figura 29, el rango de voltajes obtenidos luego de la amplificación es de aproximadamente 1 V al iniciar y 10 V al finalizar la rampa, además, la frecuencia es de 300 Hz.

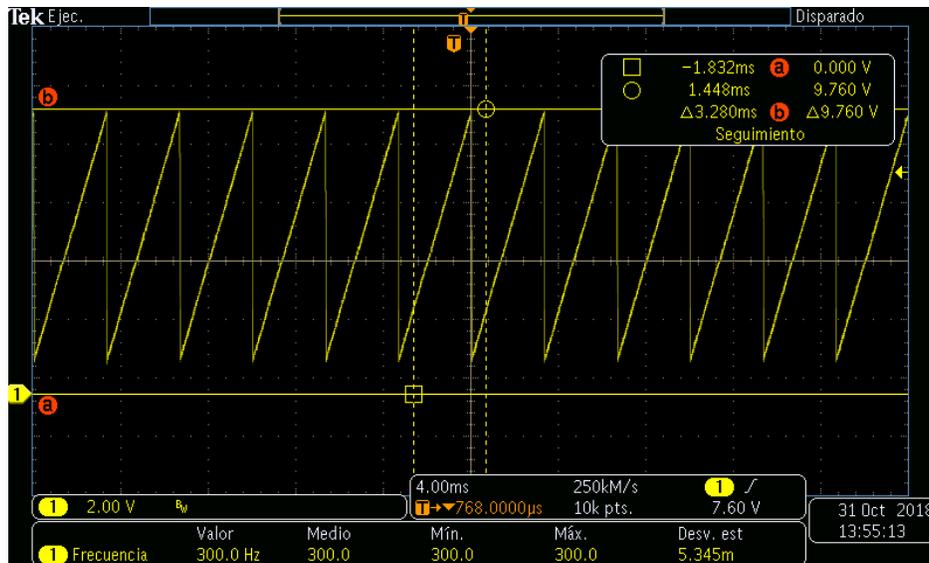


Figura 29. Circuito de acondicionamiento para la señal de transmisión

Fuente: Propia

6.1.3.2 Acondicionamiento de señal de recepción

Las señales I/Q recibidas del sensor K-LC6 deben ser acondicionadas a las necesidades del ADC rápido de la Red Pitaya. Según la hoja de especificaciones, el sensor entrega para cada señal una senoide de 20 mVpp, por lo tanto, no solamente es necesario filtrarlas, sino también hay que amplificarlas y agregarles un nivel de corriente continua para que queden acotadas entre 0 y 5V. En la figura Figura 30 se muestran las salidas del sensor K-LC6 mientras una mano se acerca y se aleja del sensor. La escala del eje del voltaje está en 20 mV, por lo cual la amplitud más baja de la senoide ronda los 10 mVpp, sin embargo, se establecerá la mínima amplitud en 5 mVpp de modo que se obtenga un diseño para el peor de los casos.

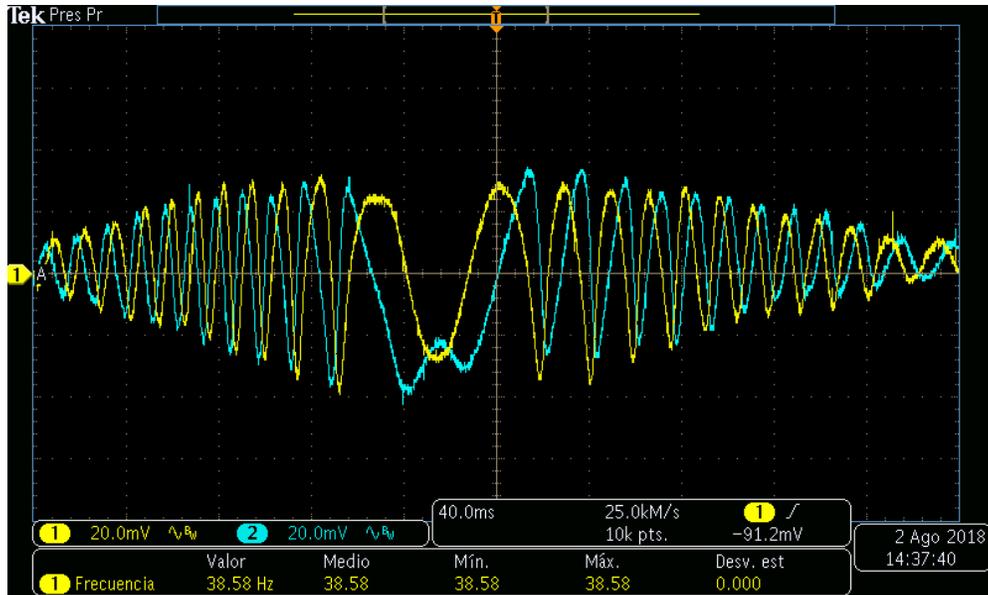


Figura 30. Salida de las señales I/Q puras

Fuente: Propia

Para el acondicionamiento de las señales de recepción I/Q se emplea un filtro activo, debido a que la señal aparte de ser filtrada requiere de una amplificación que la lleve a los niveles de voltajes descritos. Lo primero que hay que tener en cuenta es el tipo de amplificador operacional que se va a usar; en el artículo *AN-04, Typical Doppler Signal Amplifier* (39), del fabricante *RFbeam Microwave GmbH*, (mismo fabricante del sensor K-LC6) plantean unos criterios a la hora de elegir el amplificador, los cuales son:

- 1) Que se pueda alimentar con una única fuente.
- 2) Baja tensión de offset de entrada.
- 3) Alto producto ancho de banda-ganancia.
- 4) Bajo ruido.
- 5) Salida *Rail-to-Rail*.

El primer criterio es necesario que se cumpla para no depender de fuentes negativas a la hora de amplificar la señal. En el caso del segundo, se requiere que sea bajo (por lo menos menor a 10mV) para que no se afecte drásticamente la señal de salida por este parámetro. El tercer criterio requiere que sea alto (por lo menos, mayor a 2 MHz), debido a que mientras mayor es la ganancia del filtro activo menor se hace el ancho de banda y esto puede ocasionar respuestas en frecuencia indeseadas. El cuarto parámetro tiene que cumplirse para que la señal otorgada en la salida sea lo más pura posible (ruido menor que $25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) y por último el quinto parámetro se hace necesario para que el voltaje suministrado al amplificador operacional sea muy cercano al voltaje de salida otorgado por el mismo.

Analizando el mercado colombiano se encuentra un amplificador que cumple con los criterios descritos. Se trata del MC33202 (38), *Rail-to-Rail*, se puede alimentar con una única fuente, con bajo ruido (alrededor de $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) además su producto ancho de banda-ganancia es de 2.2MHz y su tensión de offset de entrada es de 8 mV.

Esta nota de aplicación también recomienda un montaje para tal fin que requiere 5 amplificadores operacionales para el presente diseño: dos para la señal en fase, dos para la señal en cuadratura y uno adicional para fijar el nivel de corriente continua deseado. Como en el circuito de acondicionamiento del transmisor se utilizó un solo amplificador operacional y quedó disponible uno, este disponible se utiliza para fijar el nivel de continua.

Dado que la máxima señal que se considera es de 5 mVpp, esta debe ser amplificada 1000 veces en voltaje y añadirle un nivel de DC de 2.5 V para tener un máximo de 5 V y un mínimo de 0 V. Para subir el nivel DC a 2.5 V, se utiliza el siguiente montaje con el amplificador operacional MC33202 que quedó disponible, el cual entrega siempre una salida de 2.5 V que será la nueva referencia del circuito de acondicionamiento de Rx:

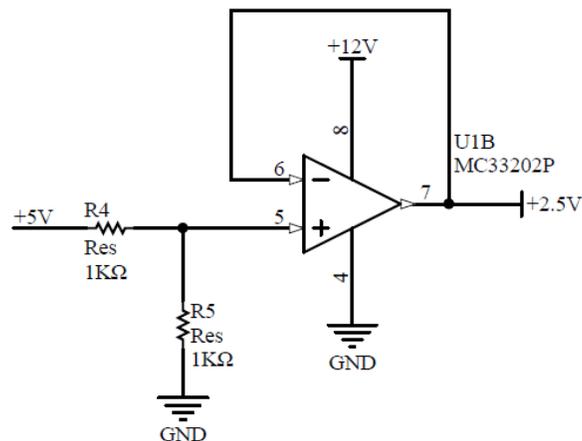


Figura 31. Circuito de acondicionamiento para nivel DC

Fuente: Propia

El circuito esquemático de acondicionamiento para cada una de las señales I/Q se muestra en la Figura 32.

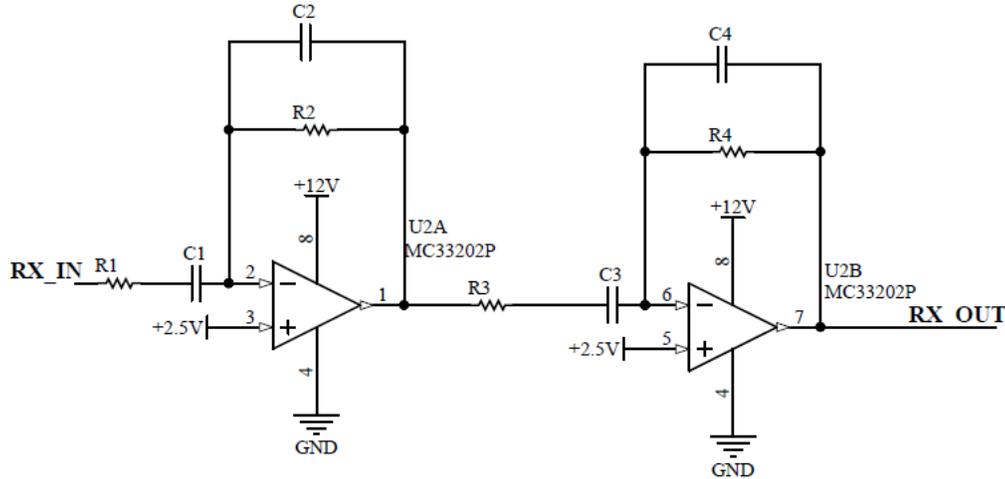


Figura 32. Circuito de acondicionamiento para las señales I/Q

Fuente: Propia

Los filtros pasa-altas están determinados por los componentes R1, C1 y R3, C3, mientras que los filtros pasa-bajas están determinados por los componentes R2, C2 y R4, C4. Así, se tiene un filtro pasa-bandas de segundo orden para cada señal. Como la ganancia en voltaje requerida es de 1000 veces (60 dB), se ha dividido esta entre dos etapas por igual, para no exceder el producto ancho de banda-ganancia (GBW = 2.2 MHz) del amplificador MC33202. Por lo tanto, basta con diseñar una de las etapas y duplicarla en la segunda.

Si se considera un alcance (R) máximo del radar de 6 metros con un ancho de banda de barrido (B) de 250 MHz (datos tomados de la hoja de especificaciones del fabricante), y una PRF típica de 300 Hz, se puede obtener la máxima frecuencia de batido esperada:

$$f_{b_{max}} = \frac{2 \cdot B \cdot PRF \cdot R_{max}}{c} = \frac{2 \cdot 250 \text{ MHz} \cdot 300 \text{ Hz} \cdot 6 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3 \text{ KHz}$$

Ecuación 33

La frecuencia de batido más pequeña esperada depende de la distancia mínima que se espera detectar con el radar. Para este proyecto se considerará que la distancia mínima para detectar es:

$$R_{min} = \frac{f_{b_{min}} \cdot c}{2 \cdot B \cdot PRF} = 0.5 \text{ m} \rightarrow f_{b_{min}} = 251 \text{ Hz}$$

Ecuación 34

Aproximando la $f_{b_{min}}$ a 250 Hz, se tiene que la distancia mínima a detectar es $R_{min} = 0.498 \text{ m}$.

Eligiendo $R1 = 2.7 \text{ K}\Omega$, se tiene por lo tanto que $R2 = 81 \text{ K}\Omega$, cuyo valor comercial más cercano es $82 \text{ K}\Omega$. La frecuencia de corte del filtro pasa-altas es:

$$f_L = 250 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1} \rightarrow C1 = 235 \text{ nF} \quad \text{Ecuación 35}$$

El valor comercial para utilizar en este caso es de $C1 = 220 \text{ nF}$, lo que genera una frecuencia de corte y un alcance mínimo definitivos de:

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.7 \text{ K}\Omega \cdot 220 \text{ nF}} = 267 \text{ Hz} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$R_{min} = \frac{f_{bmin} \cdot c}{2 \cdot B \cdot PRF} = \frac{267 \text{ Hz} \cdot 3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}}}{2 \cdot 250 \text{ MHz} \cdot 300 \text{ Hz}} = 0.52 \text{ m} \quad \text{Ecuación 37}$$

Estos valores aplican para $R3$ y $C3$ de la segunda etapa del filtro. Para el filtro pasa-bajas, teniendo en cuenta la frecuencia de batido máxima a detectar y el valor de $R2$, se tiene:

$$f_H = 3.01 \text{ KHz} = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2} \rightarrow C2 = 19.58 \text{ nF} \quad \text{Ecuación 38}$$

El valor comercial más cercano para este capacitor es $C2 = 22 \text{ nF}$, y por tanto la frecuencia de corte y el alcance máximo son:

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.7 \text{ K}\Omega \cdot 22 \text{ nF}} = 2.68 \text{ KHz} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$R_{max} = \frac{f_{bmax} \cdot c}{2 \cdot B \cdot PRF} = \frac{2.68 \text{ KHz} \cdot 3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}}}{2 \cdot 250 \text{ MHz} \cdot 300 \text{ Hz}} = 5.32 \text{ m} \quad \text{Ecuación 40}$$

Los valores de $R4$ y $C4$ son los mismos que los de $C2$ y $R2$ al ser la segunda etapa idéntica a la primera.

La ganancia en el voltaje por lo tanto puede describirse como sigue:

$$G_V = G_{V1} \cdot G_{V2} \rightarrow G_{V1} = G_{V2} = \sqrt{G_V} = \frac{R2}{R1} \approx 30.37 \quad \text{Ecuación 41}$$

Adicionalmente se debe tener en cuenta que el producto ancho de banda-ganancia del amplificador no supere los límites establecidos por el fabricante, degenerando así su comportamiento en la banda deseada:

$$f_{max} = \frac{GBW}{\sqrt{G_V}} = \frac{2.2MHz}{30.37} = 72.439KHz > f_{b_{max}} = 2.68KHz \quad \text{Ecuación 42}$$

Como puede observarse, el diseño cumple con esta condición. En resumen, los valores de los componentes pasivos, frecuencias de corte, rango y ganancia se muestran en la Tabla 7. Valores obtenidos tras el diseño de los circuitos de acondicionamiento.

Tabla 7. Valores obtenidos tras el diseño de los circuitos de acondicionamiento

f_L	f_H	G	R1	C1	R2	C2	R3	C3	R4	C4	R_{min}	R_{max}
267Hz	2.68KHz	59.30dB	2.7KΩ	220nF	82KΩ	22nF	2.7KΩ	220nF	82KΩ	22nF	0.5m	5.32m

Todos los cálculos son idénticos tanto para la señal en fase como para la señal en cuadratura.

6.1.4. Interfaz de comunicaciones

El primer paso para comenzar a trabajar con la STEMLab Red Pitaya es establecer una conexión con el PC. Puesto que la tarjeta Red Pitaya no tiene puerto para salida de video, la forma estándar para visualizar sus funcionalidades es por medio de un navegador web desde un ordenador conectado a la misma red local. Mediante esta interfaz web se pueden ver las aplicaciones como el osciloscopio, generador de señales, medidor LCR, control remoto, entre otras.

La comunicación entre la STEMLab Red Pitaya y el computador personal puede hacerse a través de una Red de Área Local (LAN, por sus siglas en inglés) o bien, vía inalámbrica a través de un adaptador USB Wi-Fi. Para propósitos del proyecto, se hace conveniente que la conexión sea inalámbrica y así evitar el uso de cables que puedan enredarse con la plataforma móvil.

Según la hoja de especificaciones de la tarjeta, el fabricante recomienda utilizar un adaptador USB Wi-Fi que use el chipset RTL8188CUS, en específico recomienda utilizar el Edimax EW7811Un. Este adaptador se conecta directamente a la tarjeta mediante el puerto USB. La hoja de especificaciones de este adaptador se encuentra en (40). En la Figura 33 se muestra el adaptador empleado.



Figura 33. Adaptador USB Wi-Fi Edimax EW7811Un

Fuente: Edimax(40)

6.1.5. Sistema de visualización de distancia

El sistema de visualización consiste en 3 LEDs de colores: verde, azul y amarillo; cada LED representa un rango de distancia para tener una visualización de la distancia en la que se encuentra el blanco con respecto al radar. Los rangos establecidos fueron:

- LED amarillo/lejos: Representa una distancia de 2m hasta 3m
- LED azul/media: Representa una distancia de 1m hasta 2m.
- LED verde/cerca: Representa una distancia de 0m hasta 1m.

En la Figura 34 se muestra el sistema de visualización de distancia que se implementó.

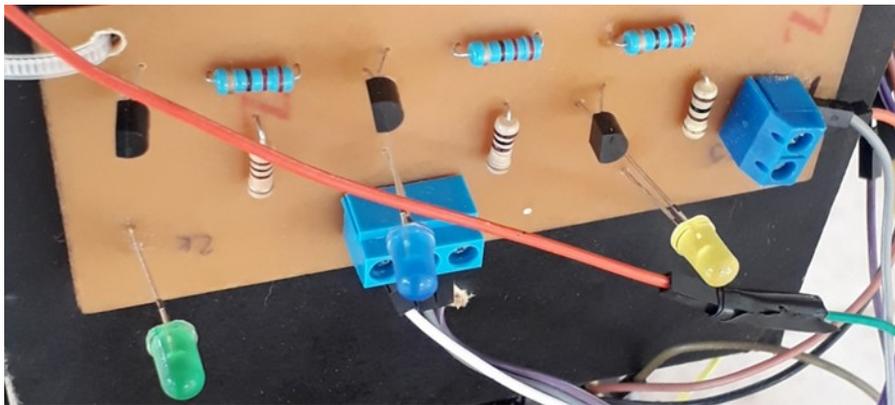


Figura 34. Sistema de visualización de distancia implementado

Fuente: propia

6.1.6. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es un sistema que proporciona un valor de tensión adecuado para el funcionamiento de cualquier dispositivo. La fuente se encarga de convertir la entrada de tensión alterna de la red en una tensión continua y constante (41). Debido a que la fuente de alimentación depende de la red eléctrica, se limita la aplicación del sistema móvil porque se necesitan cables que siempre estén conectados a la red; entre más se aleje el sistema, la longitud del cable es mayor. Para evitar ese inconveniente en esta etapa se han deshecho los cables, y se ha migrado a las baterías.

La batería es un dispositivo formado por varias celdas capaces de almacenar energía eléctrica para su uso posterior y proporcionan una alimentación que no depende de la red eléctrica (41), lo cual es necesario en el marco del proyecto debido a que se necesita que el sistema radar móvil sea autónomo. Para elegir la batería adecuada, lo primero que se analiza es el máximo valor de voltaje y corriente necesarios para suplir con las necesidades de los dos sistemas.

El corazón del sistema es una STEMLab Red Pitaya; ésta requiere de una alimentación de 5V~1.5A. El sensor K-LC6 se alimenta con una entrada de 5V~60mA, además requiere de un acondicionamiento adicional porque necesita una señal diente de sierra de 1V a 10V para alimentar el oscilador controlado por voltaje (VCO) que tiene internamente.

Para la etapa de acondicionamiento se utilizaron componentes electrónicos activos como los amplificadores operacionales y componentes electrónicos pasivos para ajustar la ganancia de los amplificadores junto con los valores de los filtros analógicos. Los amplificadores operacionales requieren un voltaje de alimentación mayor al voltaje de salida que arrojan, por lo tanto, se requieren por lo menos 12 V para alimentar el MC33202.

El adaptador USB Wi-Fi tiene un consumo aproximado de 50mA y se alimenta directamente de la tarjeta con 5V. Por último, el sistema de visualización se alimenta con 5V~80mA. En la Tabla 8 se observan los componentes y el consumo aproximado de los componentes que conforman el sistema radar.

Tabla 8. Consumo de los componentes del sistema

Componente	Consumo
STEMLab Red Pitaya	5V ~ 1.5A
K-LC6	5V ~ 60mA
Acondicionamiento Tx/Rx	12V ~ 100Ma
Adaptador USB Wi-Fi	5V ~ 50mA
Sistema de visualización de distancia	5V~80mA

Observando la Tabla 8, el máximo valor de voltaje de los componentes del sistema es 12V y el consumo de corriente total del sistema es de aproximadamente 1.79A. De acuerdo con lo anterior la batería debía suministrar mínimo 12V~2A. Para este proyecto se utilizaron dos baterías, una batería LIPO cuya salida es de 12V~2A y una batería portable *Power Bank* para alimentar la tarjeta, cuya salida es 5V~2A.

6.1.7. Diseño del PCB

Luego de definir todos los requisitos de hardware, el siguiente paso es diseñar y ensamblar la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés). Es necesario usar un software de diseño asistido por computador (CAD, por sus siglas en inglés) especializado en diseño de PCB para generar el circuito impreso

a partir del circuito esquemático. Las consideraciones de diseño que se tuvieron en cuenta fueron:

- Si es posible, separar la parte analógica de la parte digital para evitar posibles interferencias con señales de bajo nivel.
- Utilizar conectores SMA hembra para conectar las señales de RF
- Colocar el conector jack hembra 2.35 mm de alimentación en el borde superior del PCB para conectarlo/desconectarlo fácilmente y evitar posibles daños.
- Incluir orificios en cada esquina de la placa para fijar con tornillos e instalar el sistema de radar sobre la base de la plataforma móvil. El tamaño del PCB debe ser máximo de 10x10 cm

Para el diseño del PCB se empleó el software *Altium Designer 19*. El proceso de ensamblado se hizo a través del método del planchado. En la Figura 35 se muestra en la imagen de la izquierda la vista frontal del diseño 3D implementado en Altium y en la imagen de la derecha la vista frontal del PCB ensamblado. En la Figura 36 se muestra en la imagen de la izquierda la vista trasera del diseño 3D implementado en Altium y en la imagen de la derecha la vista trasera del PCB ensamblado.

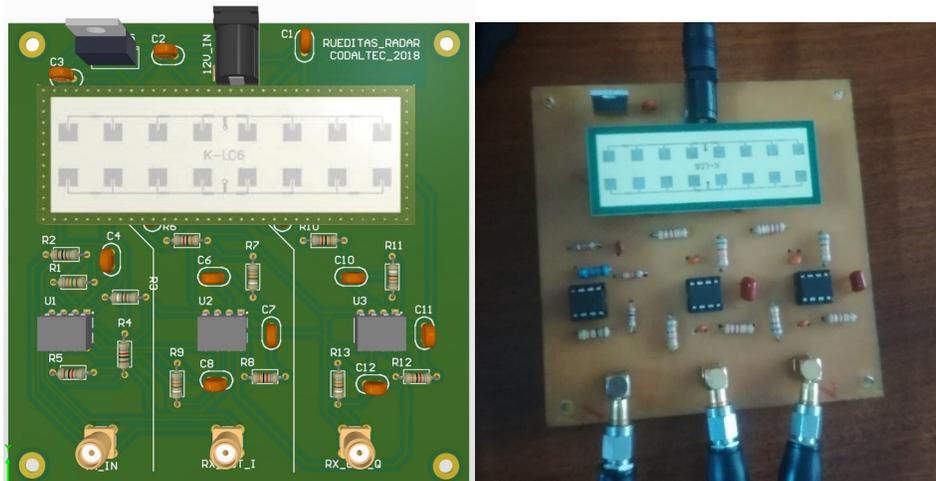


Figura 35. Vista frontal del PCB diseñado (izquierda) y ensamblado (derecha).

Fuente: propia

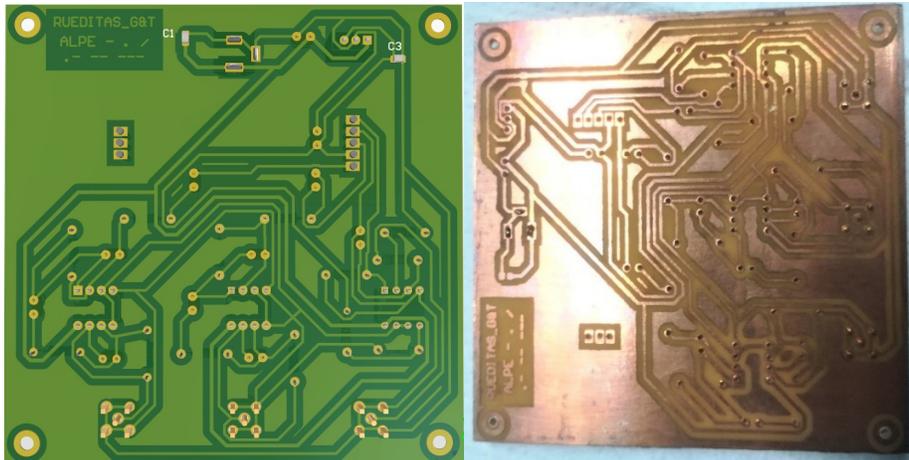


Figura 36. Vista trasera del PCB diseñado (izquierda) y ensamblado (derecha).

Fuente: propia

6.2. SOFTWARE

En este capítulo se describe el desarrollo del software necesario para el sistema radar. La tarjeta STEMLab Red Pitaya se encarga de generar la señal de transmisión, recibir las señales de recepción y enviarlas a través del adaptador USB Wi-Fi a un computador personal con MATLAB para procesarlas. Dentro de Matlab se realiza un algoritmo de procesamiento radar para visualizar el perfil de distancias a través de una interfaz gráfica; además, se emplean tres salidas digitales de la tarjeta para mostrar la visualización de la distancia a través de LEDs.

La tarjeta puede programarse a través de un compilador nativo en lenguaje C; esto quiere decir que el código se compila, se depura y corre con comandos realizados dentro de la misma tarjeta. Sin embargo, este entorno de programación no es adecuado, debido a que no se tiene una interfaz para observar los errores de código y tiene un entorno de desarrollo poco amigable con el usuario; en consecuencia, se hace conveniente utilizar la compilación cruzada.

En términos generales, un compilador cruzado es un compilador que se ejecuta en una máquina o plataforma A pero que genera un código ejecutable para una máquina o plataforma B, distinta. Esto significa que las dos plataformas, A y B, pueden ser diferentes en cuanto a arquitectura de procesador, sistema operativo y/o formato de ejecutable. Por medio de la compilación cruzada, es posible crear un código ejecutable para nuestra aplicación de forma que este código se pueda ejecutar en una plataforma distinta a la que se utilizó durante la compilación (42).

Para la compilación cruzada se usó un computador con sistema operativo Windows instalado y una máquina virtual Linux con distribución Debian 8.10. Dentro de la máquina virtual se instaló el entorno de desarrollo Eclipse junto con un *toolchain* Linaro para compilar código en C. El código del software de generación de la señal

de transmisión se realizó en C, la comunicación entre la máquina virtual y la tarjeta se estableció a través del adaptador USB Wi-Fi por medio de conexión SSH. En la Figura 37 se muestra una representación gráfica de la compilación cruzada establecida.



Figura 37. Compilación cruzada entre PC y STEMLab Red Pitaya

Fuente: propia

Se crearon entradas en un blog del grupo de investigación y desarrollo de sensores GIDS de CODALTEC con el fin de compartir el trabajo realizado con la tarjeta de desarrollo; en este blog se encuentra la información de cómo establecer comunicación con la tarjeta, cómo programarla en C o VHDL y cómo realizar la compilación cruzada. Las entradas fueron publicadas como una actividad del proyecto de pasantía. En la referencia (43) se encuentra la dirección URL del blog.

La tarjeta STEMLab también puede ser controlada remotamente a través de una interfaz Wi-Fi mediante MATLAB, Python, LabVIEW o Scilab, utilizando una lista de comandos SCPI (*Standard Commands for Programmable Instrumentation*). La interfaz/entorno SCPI se usa comúnmente para controlar los instrumentos de T&M para fines de desarrollo, investigación o automatización de pruebas. SCPI usa un conjunto de comandos que son reconocidos por los instrumentos para permitir que se tomen acciones específicas (por ejemplo: adquirir datos de entradas analógicas rápidas, generar señales y controlar otra periferia de la plataforma STEMLab de Red Pitaya). Los comandos SCPI son extremadamente útiles cuando se requiere un análisis de señal complejo donde MATLAB proporciona herramientas de análisis de datos potentes y los comandos SCPI tienen acceso simple a los datos sin procesar adquiridos en la placa STEMLab (44).

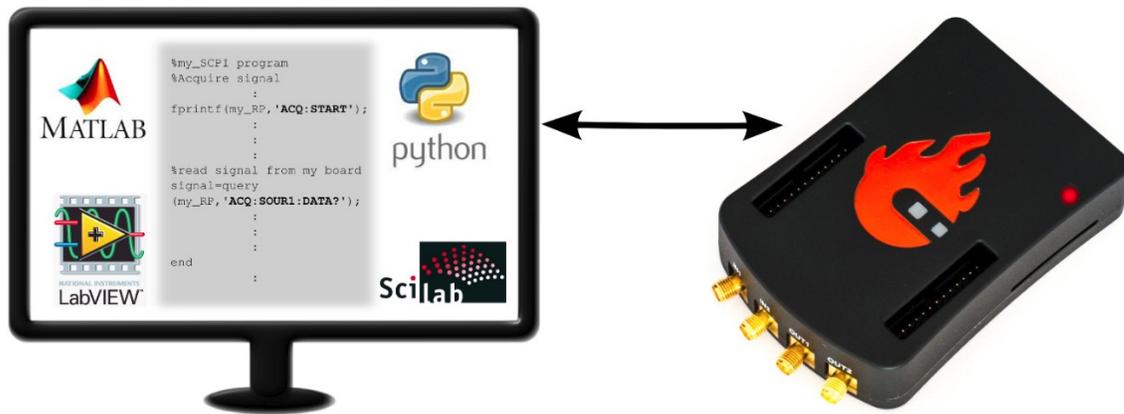


Figura 38. Conexión remota vía SCPI

Fuente: Red Pitaya STEMLab 0.97 documentation(44)

6.2.1 Software de generación de señal de transmisión

Para la generación de la señal de transmisión se empleó la compilación cruzada. En la Figura 39 se muestra el diagrama de flujo diseñado para generar la señal de transmisión.

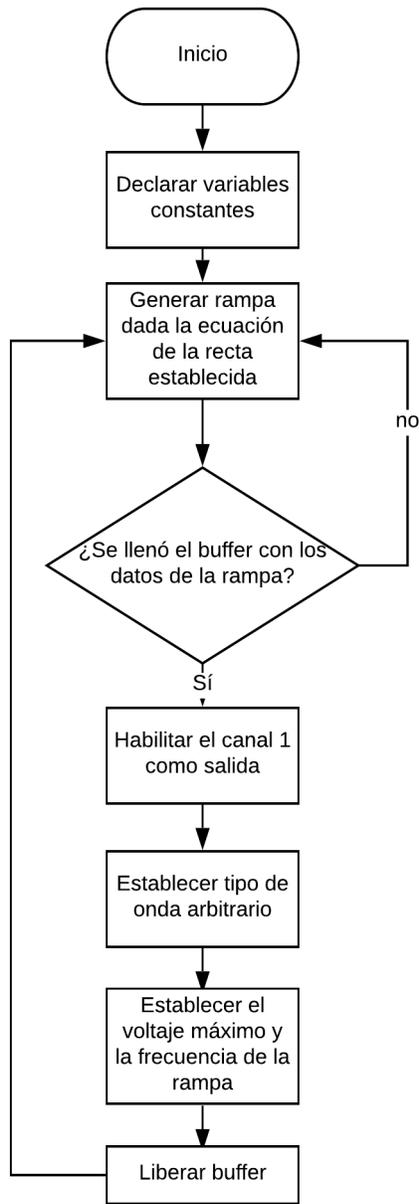


Figura 39. Diagrama de flujo del software de generación de la señal Tx

Fuente: propia

El código implementado en lenguaje C en la tarjeta, se hizo a través de compilación cruzada usando el entorno de desarrollo Eclipse CDT bajo una distribución Debian 8.10 de Linux. Dentro del código primeramente se declaran los archivos de cabecera, luego las variables globales y la función de generación de la rampa, en donde se especifica la frecuencia de operación de la rampa, que en este caso es 300 Hz y se realiza el relleno del buffer con la ecuación de la recta

planteada para la señal diente de sierra lineal a generar. Luego se configuran las funciones predefinidas en la librería *<rp.h>*, como lo son la habilitación del canal elegido, el tipo de onda, la amplitud de la señal en Voltios y la frecuencia de operación en Hertz. Por último, se libera el buffer para empezar de nuevo el programa.

Para el cálculo de la ecuación de la recta, se tiene en cuenta que en el eje x la función rampa tiene valores de 0 a 16384, ya que recorre el tamaño completo del buffer. Por otro lado, en el eje y, que en este caso es el eje de la amplitud en voltios, la función rampa tiene valores de 0.1 a 1 V para que al amplificarse por 10 satisfaga con los voltajes requeridos por el VCO del sensor radar. Al realizar la ecuación de la recta dadas las coordenadas de dos puntos: A (0,0.1) y B (16384,1) el resultado es la ecuación de la recta establecida en el código fuente final del software de generación de la señal de transmisión mostrado en el Anexo B.

6.2.2 Software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB

Para la adquisición y el procesamiento radar se empleó el servidor SCPI, aprovechando sus ventajas de conexión remota mediante MATLAB. En la Figura

40 se muestra el diagrama de flujo diseñado para la adquisición y procesamiento radar en MATLAB.

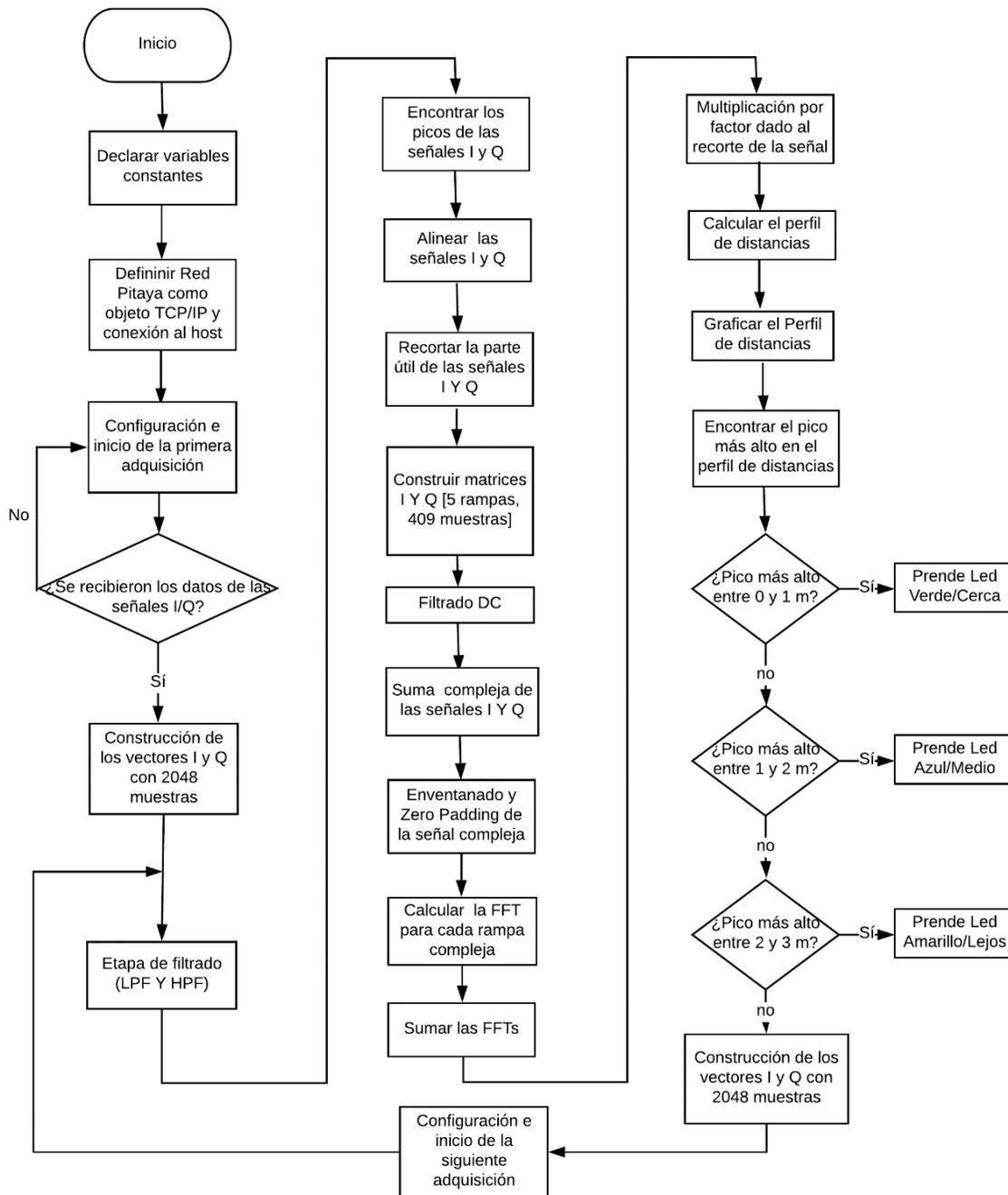


Figura 40. Diagrama de flujo del software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB

Fuente: propia

Como se puede ver en la Figura 40 lo primero que se hace es la declaración de las variables constantes (frecuencia de muestreo (f_s), ancho de banda (B), frecuencia de operación (PRF), velocidad de la luz (C), tamaño del buffer (buff_size), algunos parámetros de visualización de las señales I/Q, los

coeficientes de los filtros digitales paso-bajas y paso-altas, la longitud de la FFT, el vector de frecuencia, entre otros parámetros). Luego de esto, se hace la definición de Red Pitaya como objeto TCP/IP y conexión al host, en donde luego de conectar la tarjeta a través del servidor SCPI (a través de la API) se asigna la dirección IP junto con el puerto de esta y se inicia la comunicación por TCP/IP.

Al empezar la comunicación se configuran los parámetros para realizar una primera adquisición, en la que se obtienen los valores de voltaje de las señales I/Q en un vector con 2048 muestras. En la Figura 41 se muestran dos imágenes de las señales I/Q adquiridas en MATLAB; en la gráfica mostrada en el literal (a) no hay un blanco presente, mientras que en la gráfica mostrada en el literal (b) sí lo había.

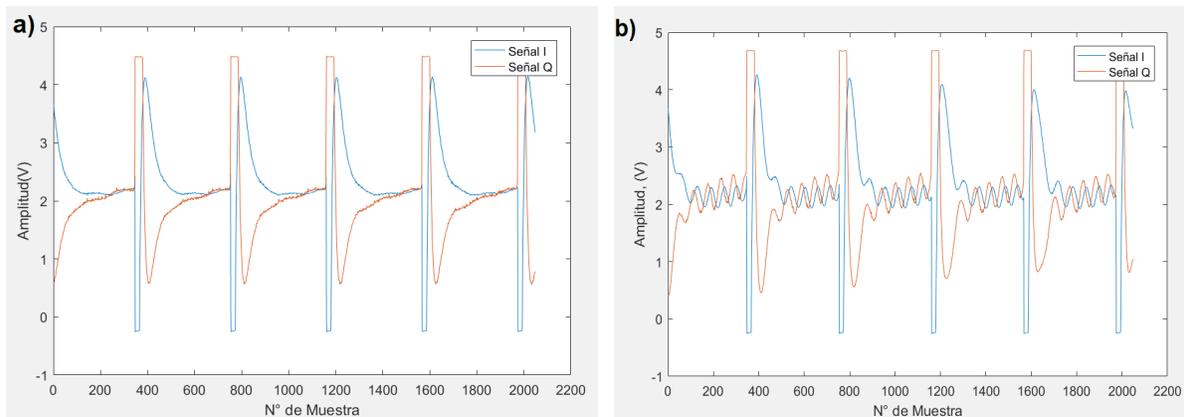


Figura 41. Señales I/Q obtenidas cuando no hay un blanco presente (a) y cuando sí lo hay (b).

Fuente: propia

Una vez que se adquieren las señales es tiempo de realizar el procesamiento. Es conveniente implementar filtros digitales para eliminar ruido en las señales adquiridas, por lo que se empleó un filtro paso bajo (LPF, por sus siglas en inglés) con frecuencia de corte de 250 Hz y luego un filtro paso alto (HPF, por sus siglas en inglés) con frecuencia de corte de 6 kHz, estos valores concuerdan con los valores de las frecuencias de corte de los filtros analógicos para que se mantenga el mismo alcance. En la Figura 42 se muestran las mismas imágenes expuestas en la Figura 41 luego de realizarles el filtrado digital.

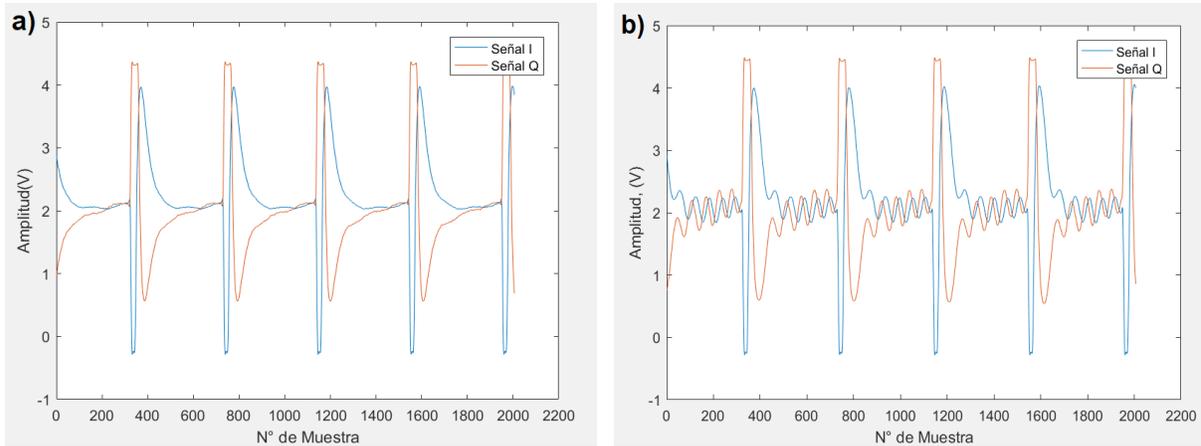


Figura 42. Señales I/Q obtenidas luego de aplicar filtros digitales LPF Y HPF.

Fuente: propia

Luego de aplicarle los filtros digitales, mediante una función de MATLAB se encuentran los picos de cada señal, los picos apreciados en la figura 42 son 5 y dado a que el último no contiene información de la señal este se ignora, por lo que se tienen en cuenta solo los 4 primeros picos que contienen la información de las respectivas 4 señales rampa tanto para la señal I como para la señal Q. Después, las señales se alinean debido a que la adquisición no se hace de forma simultánea. Tomando como ejemplo las señales del literal (b) en donde se encuentra un blanco, se muestra el proceso de alineamiento.

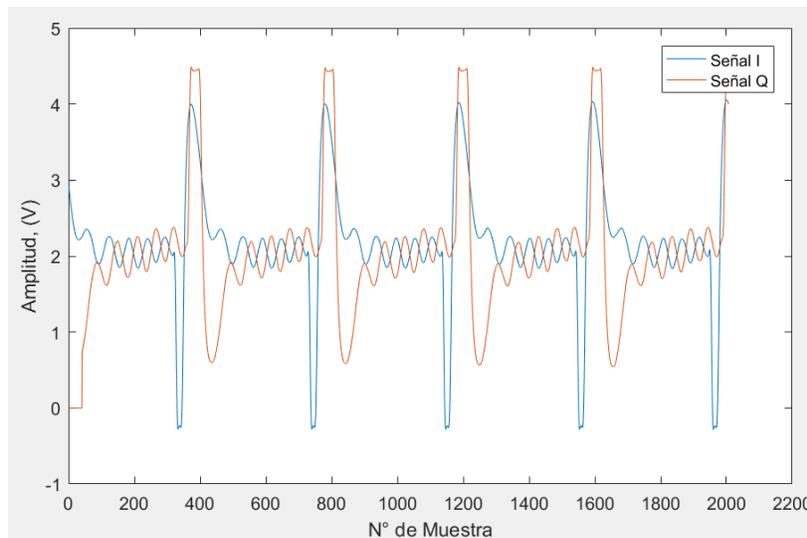


Figura 43. Alineación de las señales I/Q

Fuente: propia

Luego de alinear las señales I/Q, se recorta la parte útil de cada una de las señales visualizadas, la parte útil corresponde a las muestras donde las rampas presentan un comportamiento uniforme, aquí también se realiza un filtrado DC para reducir el lóbulo producido por la falta de aislamiento entre el transmisor y el

receptor (33). En la Figura 44 se muestra encerrada en un recuadro rojo la sección de las señales I (literal (a)) y Q (literal (b)) que debe ser ignorada para un procesamiento óptimo.

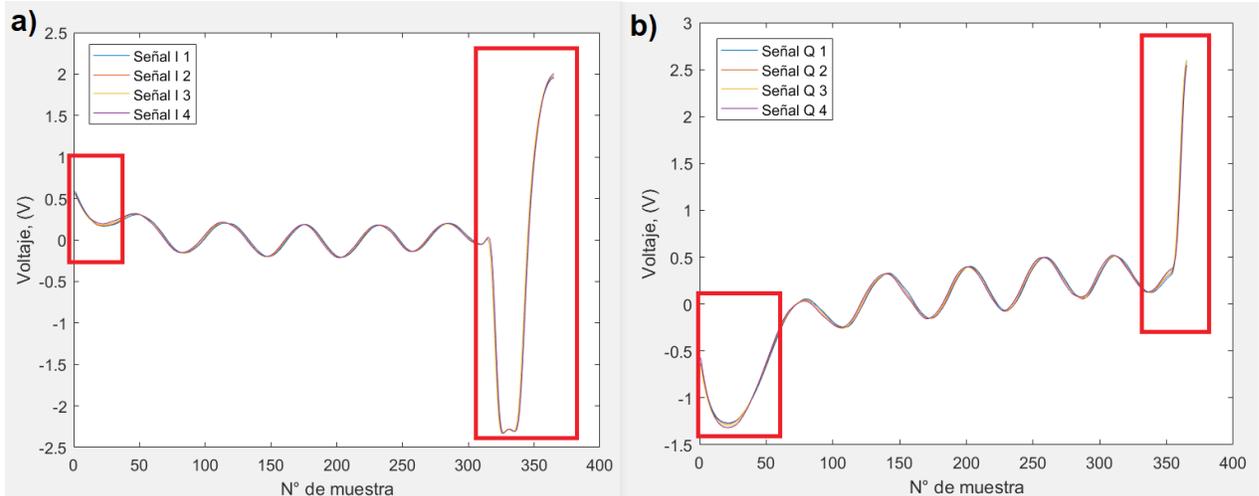


Figura 44. Sección de las señales I/Q que se plantea ignorar (en rojo)

Fuente: propia

En la Figura 45 se muestra la parte útil de las señales I (literal (a)) y Q (literal (b)).

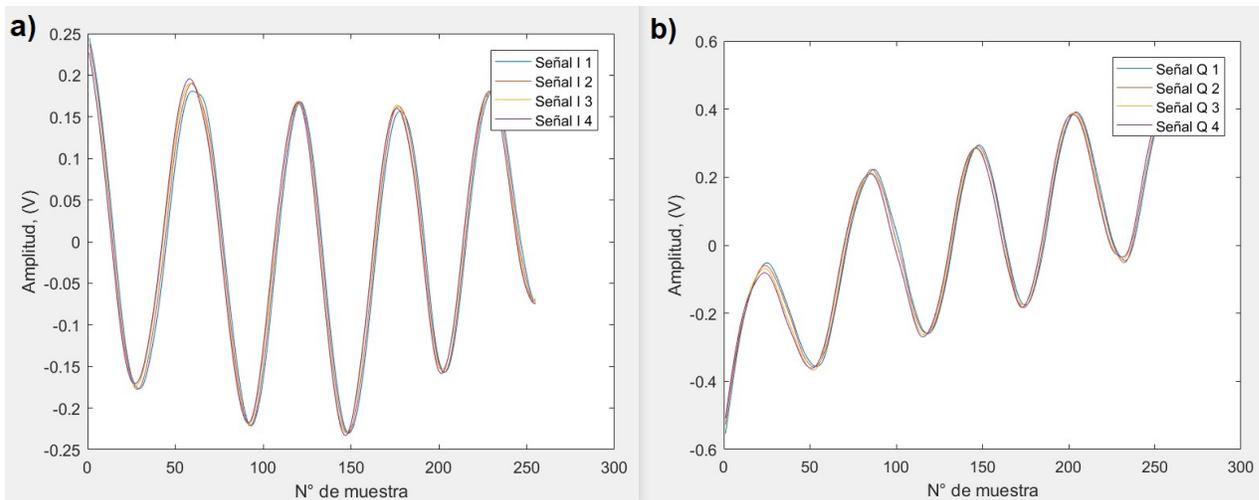


Figura 45. Sección de la parte útil de las señales I/Q

Fuente: propia

Al obtener la parte útil de las señales I y Q, se realiza la suma compleja muestra a muestra de la forma $I + jQ$, por lo que se obtiene una matriz compleja de 4 filas X 255 columnas, de modo que cada fila corresponde a una rampa. A cada rampa se le aplica un enventanado para reducir las amplitudes de los lóbulos laterales, se empleó una ventana Hamming debido a su lóbulo principal estrecho y a su alto rechazo de los lóbulos secundarios (33). Posteriormente, se emplea la técnica de *zero padding* para mejorar la resolución de la FFT. El siguiente paso consiste en

calcular la FFT para cada rampa, y luego sumar las componentes espectrales de las mismas para obtener solo un vector con la información de la señal compleja. Finalizando, se definen los ejes de la gráfica del perfil de distancia y se grafica la señal. En la Figura 46 se muestra una gráfica del perfil de distancia obtenido para un blanco que se encontraba aproximadamente a 3 metros del radar.

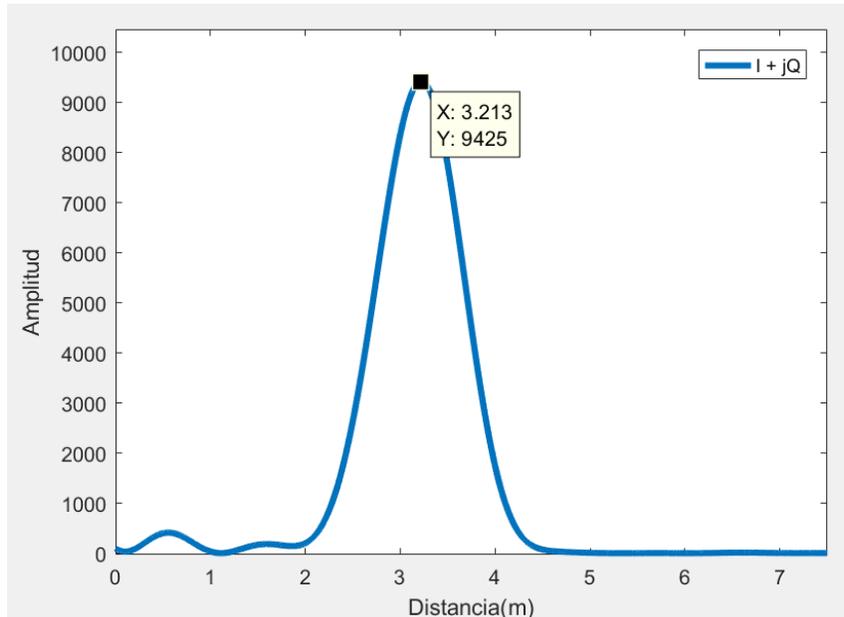


Figura 46. Gráfica del perfil de distancias

Fuente: propia

Por último, se encuentra el pico más alto en el perfil de distancia y dependiendo de su ubicación se activa/desactiva la entrada digital correspondiente a cada LED y se adquieren muestras frescas para volver a procesarlas.

El código del software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB se puede encontrar en el Anexo C.

Para la interfaz gráfica se creó un GUI con MATLAB que realizaba el procesamiento radar, y además presentaba una interfaz visual con una gráfica de amplitud vs distancia de la señal compleja procesada. Adicionalmente, la interfaz mostraba la misma coloración empleada en los rangos establecidos por el sistema de visualización de distancia. En la Figura 47 se muestra la interfaz gráfica creada con ejemplos de detección del sistema radar para cada uno de los rangos establecidos.

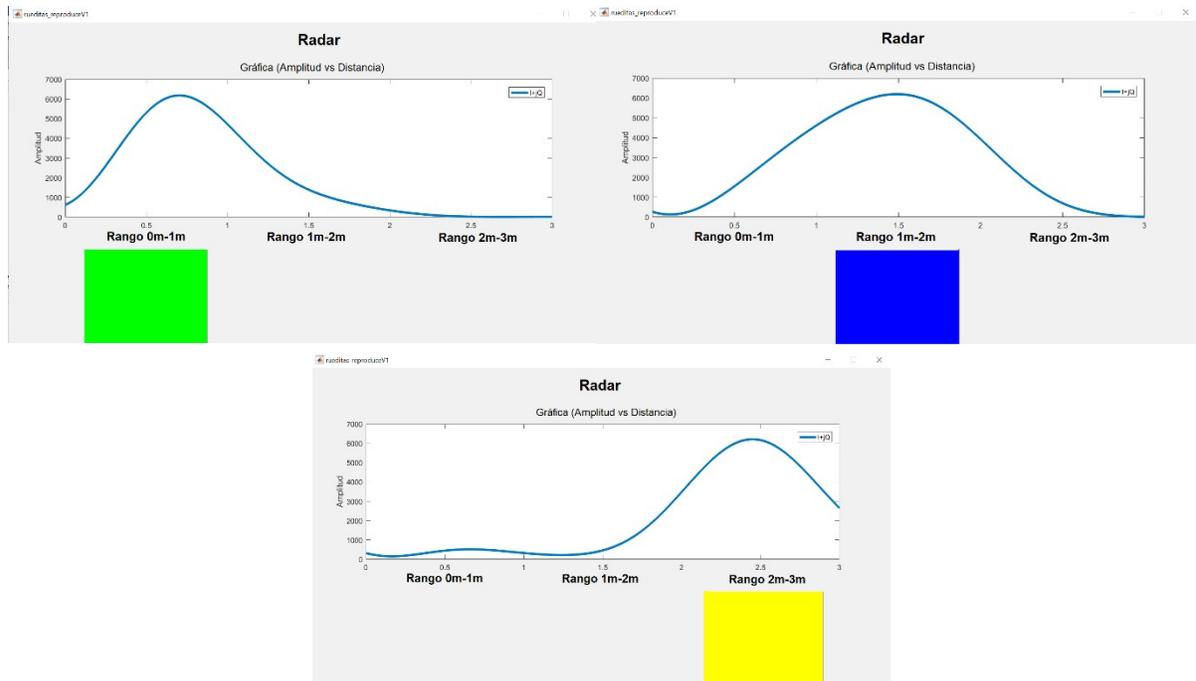


Figura 47. Interfaz gráfi-

ca en MATLAB del sistema radar móvil.

Fuente: propia

6.3. PLATAFORMA MÓVIL

La plataforma móvil es un conjunto de elementos encargados del desplazamiento del sistema radar, fue implementada con el fin analizar el comportamiento del sistema radar cuando se encontraba en movimiento. La plataforma móvil está conformada por 6 elementos:

- Una plataforma robótica
- Un mástil de madera
- 2 módulos puentes H L298N
- Una tarjeta de programación Arduino
- Una aplicación Android
- Un módulo Bluetooth

6.3.1. Plataforma Robótica

La plataforma robótica es la base del sistema radar móvil, debe ser lo suficientemente grande para soportar el peso de la tarjeta de desarrollo, las baterías, los sistemas de acondicionamiento, el sensor radar y el sistema de visualización de distancia. El laboratorio de electrónica de la Universidad de los Llanos cuenta con una plataforma robótica con muy buenas prestaciones, como lo son:

- Estructura en aluminio y paneles lexan para alta durabilidad
- 4 llantas de 12cm superficie de caucho, rin plástico.
- 4 motorreductores de 18Kg/cm con encoder.
- Batería LiPo 7.2V 2200mAH
- Largo: 28cm
- Ancho: 32cm
- Alto: 12cm (45)

Se solicitó el préstamo de la plataforma robótica 4WD2 4x4, junto con los motorreductores, la batería LiPo y el cargador de baterías. El préstamo se dio durante el desarrollo de la pasantía. Esta plataforma se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Plataforma robótica móvil

Fuente: Dynamo electronics(45)

6.3.2. Mástil de madera

El mástil de madera tenía una altura de 90 cm y se instaló en el borde frontal de la plataforma robótica para elevar la altura de los sensores radar y así disminuir el clutter proveniente del suelo. En la Figura 49 presenta una imagen de la plataforma robótica móvil con el mástil instalado.



Figura 49. Plataforma robótica móvil con mástil

Fuente: propia

6.3.3. Puente H L298N

El módulo puente H L298N se basa en el integrado L298, que es un controlador doble de puente completo diseñado para impulsar cargas inductivas como relés, solenoides, CC y motores paso a paso. Permite conducir dos motores de corriente continua, controlando la velocidad y la dirección de cada uno de forma independiente. El módulo puede ser alimentado con 4 a 35V, pudiendo conducir hasta 2A por canal (46). En la Figura 50 se muestra el módulo puente H descrito.



Figura 50. Modulo Puente H L298N

Fuente: Instructables(46)

6.3.4. Tarjeta de programación Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. El microcontrolador de la placa se programa usando el “*Arduino Programming Language*” (basado en Wiring) y el “*Arduino Development Environment*” (basado en Processing) (47). El Arduino se utilizó exclusivamente para controlar los motores y gestionar la comunicación bluetooth, ver Figura 51.



Figura 51. Tarjeta de programación Arduino UNO

Fuente: Arduino Chile (48)

Para el control de giro de los motores en este proyecto se utilizó esta tarjeta, porque tiene una plataforma de programación muy fácil de usar y en la cual se tiene familiarización. No se empleó la STEMLab Red pitaya para tener completamente aislados los sistemas de la plataforma móvil y el sistema radar. Además, la tarjeta se encargaba de la generación, adquisición y envío de la señal del módulo radar, introducirle otra tarea incrementaría su carga computacional y afectaría el tiempo de adquisición y ejecución del sistema radar.

Después de realizar la programación del control de giro de los motores de la plataforma robótica, se desarrolló una App en Android para controlar la dirección de movimiento de la plataforma móvil a través de un teléfono móvil.

6.3.5. Aplicación Android

La aplicación desarrollada tiene una interfaz sencilla, cuenta con un botones de encendido/apagado; además, cuenta con cuatro botones que proporcionan un control de la dirección en la que se quiere manejar la plataforma móvil: Adelante, Atrás, Derecha e Izquierda. Por último, tiene un botón en la parte superior para establecer conexión con el módulo bluetooth, el cual a su vez se comunica con el Arduino, por lo tanto, sirve como un puente de comunicación entre el teléfono móvil y la plataforma móvil. En la Figura 52 se muestra la interfaz de la aplicación desarrollada para el control de la plataforma móvil.



Figura 52. Interfaz de Aplicación Android

Fuente: propia.

6.3.6. Módulo Bluetooth

Para establecer una conexión inalámbrica entre la aplicación desarrollada en el teléfono móvil y el Arduino incorporado en la plataforma móvil se puede emplear tecnología Bluetooth. El módulo bluetooth HC06 cuenta con puertos de Tx y Rx, que permite conexiones a una distancia de hasta 20 metros como máximo, se puede configurar por medio de comandos AT enviados a través de puerto serial y se alimenta con voltajes entre 3.6 a 6 V. Por lo regular estos módulos son para aplicaciones con microcontroladores o plataformas de desarrollo de hardware como la tarjeta Arduino. En la Figura 53 se presenta el módulo bluetooth empleado.

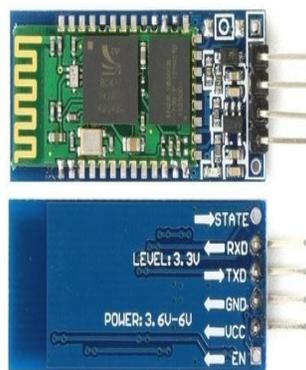


Figura 53. Módulo inalámbrico Bluetooth HC06

Fuente: HC-06 datasheet (49)

7. PROTOCOLO DE PRUEBAS

En este capítulo se muestran los obstáculos establecidos, los escenarios de pruebas escogidos y los pasos realizados durante las pruebas. Además, se realiza un cálculo para determinar el número mínimo de datos necesarios para presentar un análisis confiable.

7.1. DESCRIPCIÓN

Para las pruebas se escogieron 4 obstáculos con diferentes características, por ello se plantea hipotéticamente que tienen diferente RCS. Los obstáculos escogidos fueron: una pared, unas sillas apiladas, una persona y una rama. Ver Figura 54.

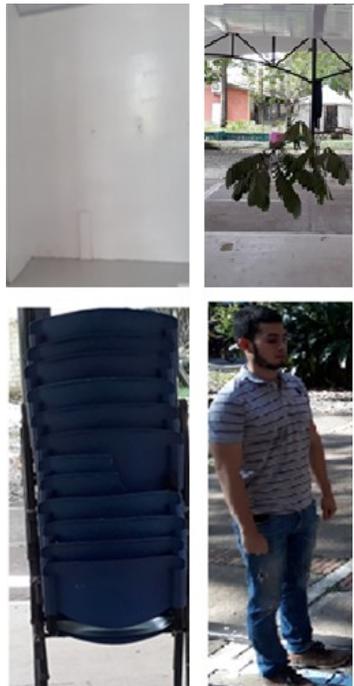


Figura 54. Obstáculos escogidos para las pruebas

Fuente: propia

Las pruebas fueron realizadas en un lugar que cumpliera las siguientes condiciones:

- Que estuviese despejado: para disminuir los ecos o reflexiones de blancos que no hicieran parte de las pruebas (clutter).

- Con suelo liso y uniforme: con el propósito de disminuir las vibraciones ocasionadas por el desplazamiento de la plataforma móvil a través de la superficie, lo cual podría ocasionar detecciones erróneas o falsas alarmas.

Las pruebas para los obstáculos *sillas apiladas*, *persona* y *rama* se realizaron a las afueras del kiosco central de la Universidad de los Llanos, ya que este espacio reunía los requisitos anteriormente descritos. Para el obstáculo *pared* la prueba se hizo dentro del kiosco. La Figura 55 muestra el escenario elegido para realizar las pruebas.



Figura 55. Escenario escogido para realizar las pruebas

Fuente: propia

7.2. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE PRUEBAS

En las metodologías de determinación del número mínimo de observaciones, se debe asignar la variación esperada entre los datos de los grupos de control y experimento. Este valor es tomado, usualmente, de observaciones de estudios análogos, de la literatura, o a partir de pruebas “cortas” preliminares; sin embargo, esto no siempre será posible, más aún en el caso en que el objeto de análisis sea una tecnología, metodología, proceso o procedimiento nuevo(50). El propósito de plantear el análisis es verificar si el sistema nuevo evaluado funciona de la manera esperada o, por el contrario, no surte efecto alguno.

La Ecuación 43 es el modelo propuesto en el artículo (50) para la determinación del número mínimo de observaciones, de pruebas o de datos que deben efectuarse u obtenerse para experimentos de un solo factor.

$$n = \frac{(w-w^2)*(z_\beta + (1.4*z_\alpha)^2)}{w^2}$$

Ecuación 43

Donde,

n = Número mínimo de muestras, observaciones o réplicas que deben efectuarse en el estudio.

Z_α = Valor correspondiente al nivel de confianza asignado.

Z_β = Valor correspondiente al poder estadístico o potencia asignada a la prueba.

W = Rendimiento mínimo esperado, eficiencia mínima esperada o diferencia mínima observable.

Los valores de Z_α y Z_β para diferentes niveles de confianza, se presentan en las y 10.

Tabla 9. Valores de Z_α para diferentes niveles de confianza

α	Nivel de confianza (1- α) (%)	Z_α
0.050	95.0	1.960
0.025	97.5	2.240
0.010	99.0	2.576

Tabla 10. Valores de Z_β para diferentes niveles de poder estadístico

β	Poder estadístico (1- α) (%)	Z_β
0.20	80.0	0.842
0.15	85.0	1.036
0.10	90.0	1.282

Para un método, tratamiento, técnica, tecnología o sistema nuevo es recomendable tener los valores más bajos de Z_α y Z_β que aparecen en las Tabla 9 y Tabla 10, además se debe considerar un valor de W no mayor a 30%, para tener el mínimo rendimiento y analizar si los resultados tienen un comportamiento confiable.

Para este experimento se tomó un valor de Z_α de 1.96 que corresponde a un nivel de confianza del 95%, un Z_β de 0.842 que corresponde a un poder estadístico de 80% y un W de 0.2 que corresponde a un valor del 20%. Reemplazando los valores en la Ecuación 43 se tiene que:

$$n = \frac{(0.2-0.2^2)*(0.842+(1.4*1.96)^2)}{0.2^2} = 51$$

Ecuación

Por lo tanto, el número mínimo de pruebas que deben realizarse para cada obstáculo son 51.

7.3. EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

Para las pruebas se realizaron los siguientes pasos para cada uno de los 4 obstáculos mencionados anteriormente.

1. Colocar una cinta métrica de 3 metros de largo como referencia de distancia.
2. Ubicar el carro a una distancia de 3 metros del sensor e iniciar marcha hacia adelante de manera que el sensor se aproxime de manera radial hacia el obstáculo a una velocidad constante.
3. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el LED amarillo se encienda.
4. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el LED azul se encienda.
5. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el LED verde se encienda.
6. Detener la marcha cuando el sistema radar móvil se encuentre a una distancia de 10cm con respecto al obstáculo.
7. Iniciar marcha en sentido contrario hasta llegar a una distancia de 3m
8. Repetir los pasos del 2 al 7 hasta completar las 51 pruebas.

En la Figura 56 se muestra el escenario de pruebas con la pared como obstáculo. Los rieles que se pueden ver en la imagen se colocaron debido a que la plataforma móvil tenía una desviación en su movimiento y se requería un apuntamiento del sensor completamente radial hacia al obstáculo. Al terminar la cantidad de pruebas establecidas se guardaron las evidencias en archivos de video marcados con la siguiente nomenclatura: Pruebas_[Obstáculo][número de repeticiones]; por ejemplo, Pruebas_Pared51.



Figura 56. Sistema radar móvil en operación

Fuente: Propia

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, las pruebas se realizaron con 4 obstáculos diferentes: una pared, unas sillas apiladas, una persona y una rama. Cada obstáculo se dispuso de tal forma que la altura del sensor radar sobre la plataforma móvil (90 cm) coincidiera de frente con el obstáculo.

Se realizaron 51 pruebas y se estimó la densidad de probabilidad para cada obstáculo, la cual sirvió para modelar la distribución de la probabilidad en función de la distancia de encendido de cada LED para los diferentes obstáculos. Existen muchas formas para calcular la densidad de probabilidad, tales como la distribución de variable aleatoria uniforme, variable aleatoria gaussiana, variable aleatoria exponencial, entre otras. Para el proyecto se utilizó una densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana debido a su sencillez de implementación. La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos y modelos estadísticos(51). La función de densidad para este tipo de distribución está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Ecuación 45

Donde: x = distancia establecida;
 σ = desviación estándar;

σ^2 = varianza;
 μ = media.

La densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana se aplicó a cada uno de los resultados de las pruebas para cada obstáculo en el que se evaluó el sistema radar. Adicionalmente, para estimar cómo se distribuye la probabilidad entre los distintos números reales de los datos se usó un histograma. Un histograma es una representación gráfica en forma de barras, donde la altura de cada barra es proporcional a la frecuencia relativa de los valores que puede tomar la variable aleatoria (51). En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables que en este caso son la distancia en metros.

A cada uno de los 4 obstáculos se le tomaron las 51 pruebas independientemente. Es decir, se colocó el obstáculo, se realizaron las pruebas, se tomó el video, se cambió al siguiente obstáculo y así sucesivamente hasta completar todos los obstáculos. La medición se registró en el momento en que el LED permaneció encendido.

8.1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Los resultados se exponen de forma individual para cada obstáculo, en ellos se muestra el histograma, la tabla de valores estadísticos y la densidad de probabilidad. Para calcular la densidad de probabilidad con una distribución de variable gaussiana es necesario conocer los valores de media, varianza y desviación estándar de las pruebas realizadas. Estos valores estadísticos también son de ayuda a la hora de interpretar los resultados, debido a que la media de la densidad de probabilidad se asume como la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los rangos de distancia indicados por los leds, y la desviación estándar ayuda a estimar qué tan separados están los datos respecto a la media en los rangos establecidos para el sistema radar. Además, también se tienen en cuenta la probabilidad de detección (PD) y la tasa de falsa alarma (FAR).

En el Anexo D se muestran las tablas con los datos obtenidos para cada obstáculo.

8.1.1. Pared

En la Figura 57 se muestra el montaje establecido para realizar las pruebas con el obstáculo *pared*.



Figura 57. Montaje de pruebas con obstáculo pared

Fuente: Propia

En la Figura 58 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con la pared como obstáculo, cada color equivale a cada uno de los rangos indicados por los LEDs.

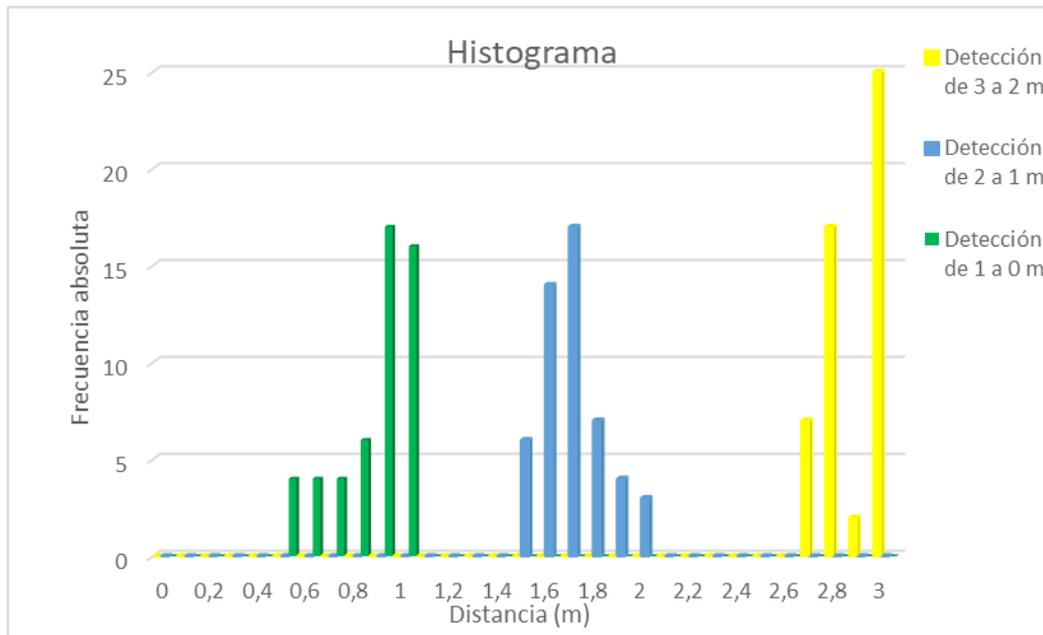


Figura 58. Histograma resultante para obstáculo pared

Fuente: Propia

En la Tabla 11 se muestran los valores estadísticos obtenidos para el obstáculo *pared*.

Tabla 11. Valores estadísticos para obstáculo *pared*

Obstáculo: Pared	LED amarillo/lejos	LED azul/media	LED verde/cerca
Media (m)	2,88824	1,69608	0,84902
Varianza (m^2)	0,01386	0,01758	0,02495
Desviación estándar (m)	0,11772	0,13261	0,15795
PD	100%	100%	100%

Reemplazando los valores de varianza, media y desviación estándar en la ecuación 45 y tomando valores de x desde 0 hasta 3.3, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 59.

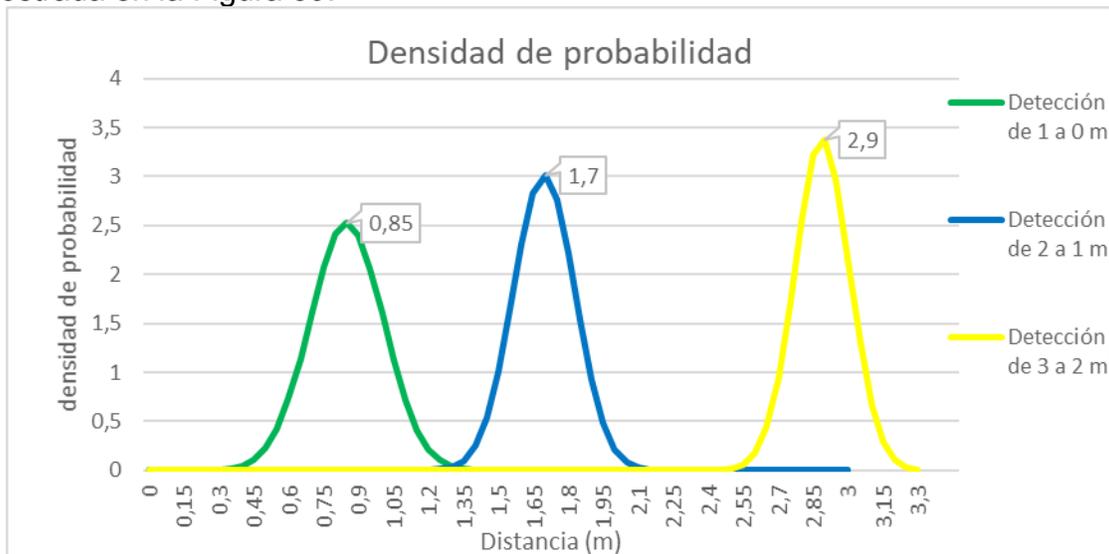


Figura 59. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo *pared*

Fuente: Propia

8.1.2. Sillas apiladas

En la Figura 60 se muestra el montaje establecido para realizar las pruebas con el obstáculo *sillas apiladas*.



Figura 60. Montaje de pruebas con obstáculo sillas apiladas

Fuente: Propia

En la Figura 61 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con las sillas apiladas como obstáculo, cada color equivale a cada uno de los rangos indicados por los LEDs.

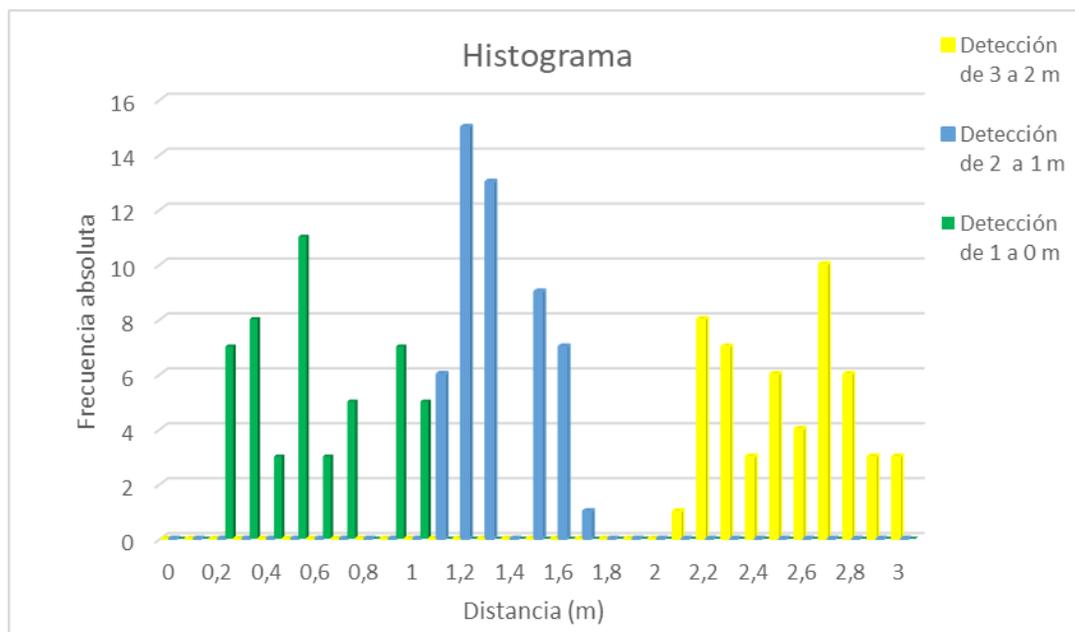


Figura 61. Histograma resultante para obstáculo sillas apiladas

Fuente: Propia

En la Tabla 12 se muestran los valores estadísticos obtenidos para el obstáculo *sillas apiladas*.

Tabla 12. Valores estadísticos para obstáculo sillas apiladas

Obstáculo: Sillas apiladas	LED amarillo/lejos	LED azul/media	LED verde/cerca
Media (m)	2,53824	1,31373	0,54286
Varianza (m^2)	0,06576	0,02971	0,07031
Desviación estándar (m)	0,25643	0,17236	0,26517
PD	100%	100%	96%

Reemplazando los valores de varianza, media y desviación estándar en la ecuación 45 y tomando valores de x desde 0 hasta 3.3, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 62.

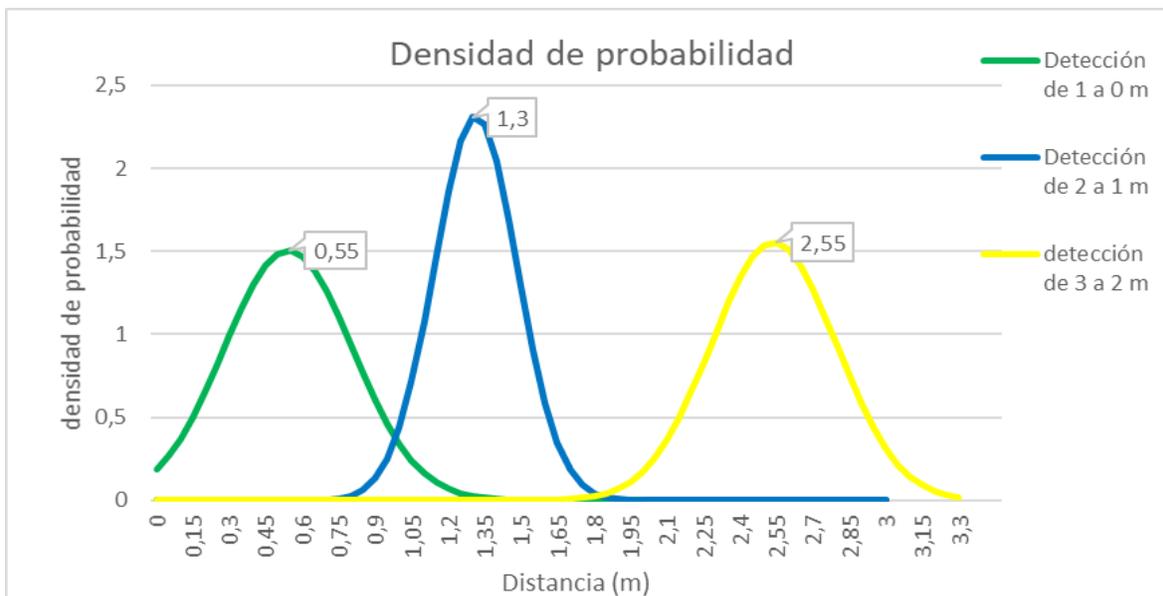


Figura 62. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo sillas apiladas

Fuente: Propia

8.1.3. Persona

En la Figura 63 se muestra el montaje establecido para realizar las pruebas con el obstáculo *persona*.



Figura 63. Montaje de pruebas con obstáculo persona

Fuente: Propia

En la Figura 64 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con la persona como obstáculo, cada color equivale a cada uno de los rangos indicados por los LEDs.

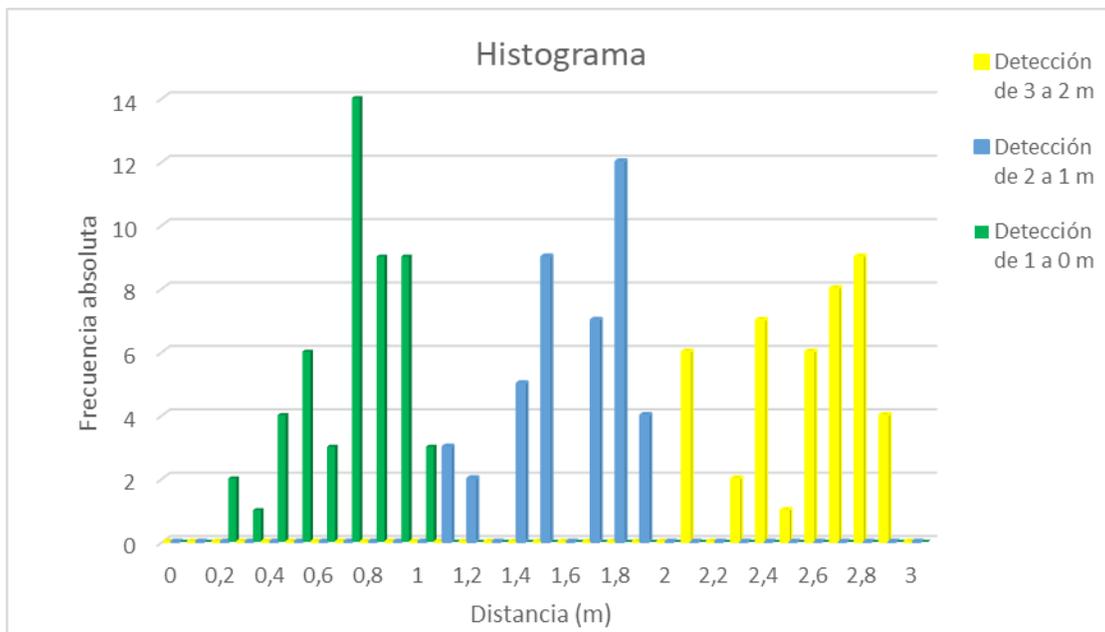


Figura 64. Histograma resultante para obstáculo persona

Fuente: Propia

En la Tabla 13 se muestran los valores estadísticos obtenidos para el obstáculo *persona*.

Tabla 13. Valores estadísticos para obstáculo persona

Obstáculo: Persona	LED amarillo/lejos	LED azul/media	LED verde/cerca
Media (m)	2,55698	1,58690	0,68235
Varianza (m^2)	0,06828	0,05306	0,04148
Desviación estándar (m)	0,26131	0,23034	0,20367
PD	84%	82%	100%

Reemplazando los valores de varianza, media y desviación estándar en la ecuación 45 y tomando valores de x desde 0 hasta 3.3, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 65.

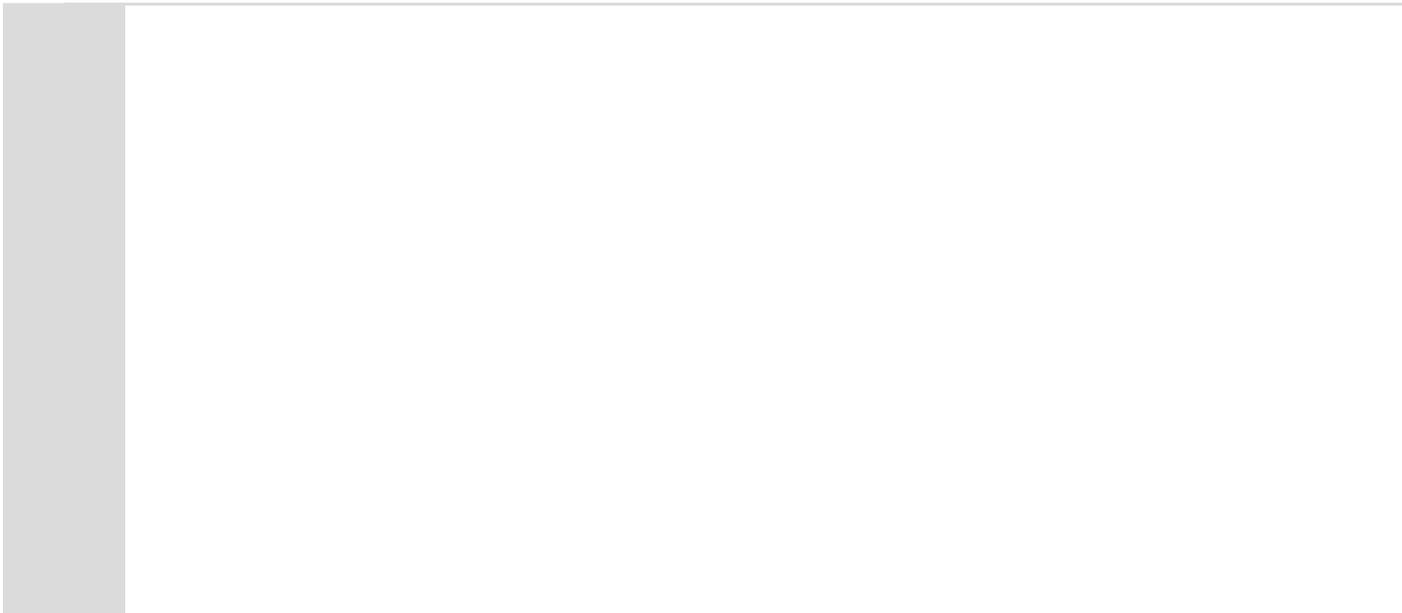


Figura 65. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo persona

Fuente: Propia

8.1.4. Rama

En la Figura 66 se muestra el montaje establecido para realizar las pruebas con el obstáculo *rama*.



Figura 66. Montaje de pruebas con obstáculo rama

Fuente: Propia

En la Figura 67 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con la pared como obstáculo, cada color equivale a cada uno de los rangos indicados por los LEDs.

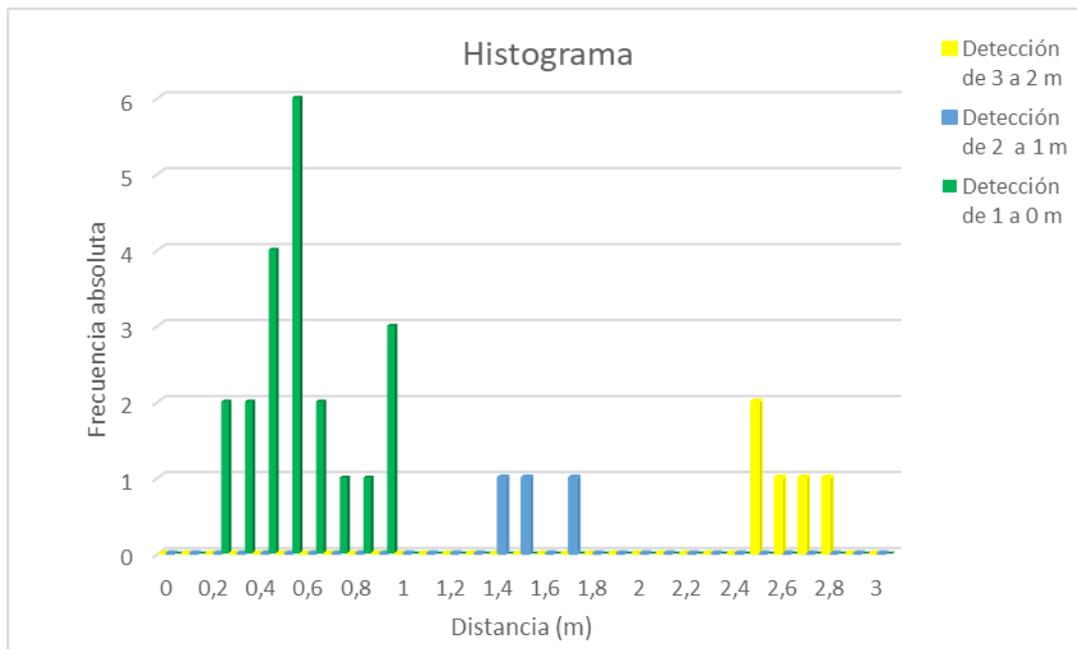


Figura 67. Histograma resultante para obstáculo ramas

Fuente: Propia

En la Tabla 14 se muestran los valores estadísticos obtenidos para el obstáculo *rama*.

Tabla 14. Valores estadísticos para obstáculo *rama*

Obstáculo: Rama	LED amarillo/lejos	LED azul/media	LED verde/cerca
Media (m)	2,62000	1,53333	0,50238
Varianza (m^2)	0,01700	0,02333	0,04612
Desviación estándar (m)	0,13038	0,15275	0,21475
PD	10%	6%	41%

Reemplazando los valores de varianza, media y desviación estándar en la ecuación 45 y tomando valores de x desde 0 hasta 3.3, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 68.

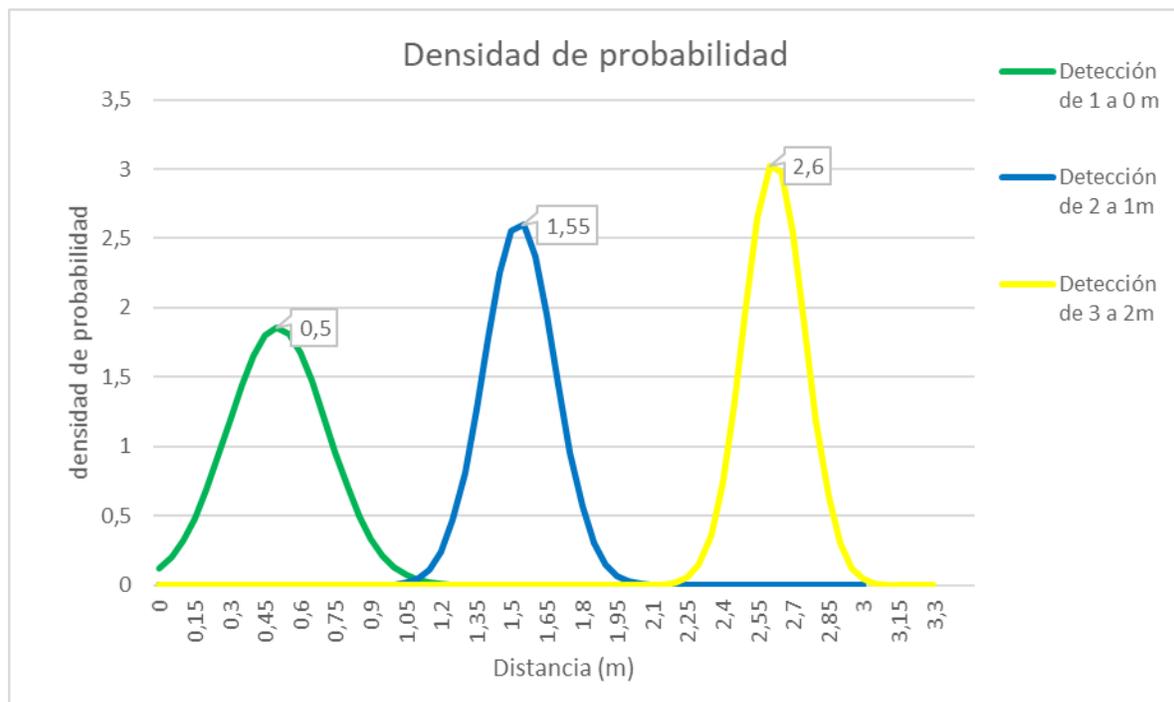


Figura 68. Densidad de probabilidad resultante para obstáculo *rama*

Fuente: Propia

8.1.5. Tasa de falsa alarma

Adicionalmente se realizó un grabado de las pruebas sin ningún obstáculo para determinar la tasa de falsa alarma, que es la probabilidad de generar una alerta con un blanco no existente. Para calcular la tasa de falsa alarma de cada uno de los leds, se tomaron los datos obtenidos de las pruebas sin ningún obstáculo, se

sumaron los datos donde se obtuvieron detecciones y se dividieron por el número total de pruebas.

Los resultados de la tasa de falsa alarma se muestran en la Tabla 15

Tabla 15. Tasa de falsa alarma del sistema radar

Tasa de falsa alarma	
Tasa de falsa alarma LED amarillo/lejos:	12%
Tasa de falsa alarma de LED azul/medio:	0%
Tasa de falsa alarma de LED verde/cerca	0%

8.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LAS PRUEBAS

Dado a que los resultados de las pruebas del radar solo se tomaron en la trayectoria de ida (radar hacia el obstáculo), lo ideal era que la detección se realizara en el límite superior del rango establecido, o bien, en el caso del LED amarillo/lejos en 3 m, en el caso del LED azul/media en 2 m y en el caso del LED verde/cerca en 1 m. Sin embargo, al observar los datos de la media obtenida para cada obstáculo eso no fue así, siendo más cercanas las detecciones con el obstáculo *pared* ya que se obtuvieron medias de 2.89 m, 1.70 m y 0.85 m respectivamente para cada rango; Mientras que con los demás obstáculos las detecciones se alejaron bastante del límite superior del rango establecido, siendo el obstáculo *sillas apiladas* el que más se alejó en los rangos del LED amarillo/lejos y LED azul/cerca con medias de 2.54 m y 1.31 m respectivamente, y en cuanto al LED verde/cerca el obstáculo *rama* fue el que presentó mayor alejamiento con respecto a su límite superior con una media de detecciones de 0.5 m.

Por otro lado, el factor de dispersión dado por la desviación estándar es menor para el obstáculo *pared* en los 3 rangos establecidos. En cambio, es mayor para el obstáculo *persona* en los LED amarillo/lejos y azul/media, y en cuanto al LED verde/cerca el obstáculo *rama* fue el que presentó mayor dispersión en sus datos.

Dicho lo anterior, se podría pensar que el obstáculo *rama* es un mejor blanco en comparación a los obstáculos *sillas apiladas* o *persona*, puesto que sus resultados son más exactos y precisos en 2 de los 3 rangos establecidos. Sin embargo, al observar la probabilidad de detección, el obstáculo *rama* es al que peor le va, teniendo valores que rondan el 10%, lo cual es bastante malo. Esto se debió a la baja RCS y poca reflectividad que tenía el obstáculo *rama*, haciéndola únicamente detectable cuando se encontraba demasiado cerca al sensor radar. Con respecto a los demás obstáculos, la probabilidad de detección para el obstáculo *pared* fue del 100% en los 3 rangos establecidos, y hay una leve mejor probabilidad de

detección para el obstáculo *sillas apiladas* en comparación con el obstáculo *persona*.

Es por eso que hipotéticamente se plantea que la RCS del obstáculo *pared* es la más alta, seguida por la RCS de las sillas apiladas, seguida por la RCS de la persona y por último la RCS de la rama, siendo hipotéticamente la RCS más baja. Por ende, hubo un mejor desempeño a nivel general del radar móvil con el obstáculo *pared* y un peor desempeño con el obstáculo *rama*.

Los valores de la tasa de falsa alarma mostrados en la Tabla 15 pueden darse por múltiples factores, uno de los más influyentes es el ruido del entorno o *clutter*, puesto que a medida que se alejaba el radar aumentaba la tasa de falsa alarma debido a que el escenario escogido para realizar las pruebas no era el ideal (como lo puede ser una cámara anecoica). Otro factor que pudo afectar la tasa de falsa alarma fueron las vibraciones ocasionadas por el movimiento de la plataforma móvil, ya que la mecánica de la plataforma móvil era muy básica.

9. CONCLUSIONES

- Los radares móviles están ganando terreno dentro del campo de la teledetección ya que pueden ser empleados en aplicaciones para usos comerciales o civiles, como por ejemplo en la navegación autónoma de vehículos o el asistente para personas con discapacidad visual, ambos descritos en este informe. En este caso se realizó el estudio solo a distancias cortas, porque se considera el uso del radar para un proyecto en concreto de CO-DALTEC que implica detecciones a muy corto alcance.
- El sensor radar K-LC6 está diseñado para lograr detectar vehículos hasta 60 metros de distancia, o personas hasta 25 metros de distancia; sin embargo, dentro del marco del proyecto se empleó para una distancia máxima de 3 metros. La respuesta del sensor ante la detección de los obstáculos varió acorde a la RCS que tenían, ya que con la pared tuvo una probabilidad de detección del 100% ante los 3 rangos establecidos, mientras con los demás obstáculos la probabilidad de detección fue menor, siendo la rama el objeto menos detectable.
- La velocidad de la plataforma móvil era de 0.25 m/s y el perfil de distancia de la aplicación hecha en Matlab se actualizaba cada 0.5 segundos aproximadamente. Por lo tanto, las detecciones llegaban a tener un error hasta de 0.125 m debido al retraso producido por el tiempo entre cada actualización. Lo anterior pudo perjudicar en cierta parte los resultados obtenidos, de manera que en un trabajo futuro se requiere que la actualización del perfil de distancia sea aún más rápida para disminuir el error producido.

- La tasa de falsa alarma presentada en el sistema radar móvil se debió, entre otros factores, al escenario en el que se realizaron las pruebas, dado a que estaba expuesto a ruido de entorno o *clutter*. Otro factor que pudo afectar la tasa de falsa alarma fueron las vibraciones ocasionadas por el movimiento de la plataforma móvil, ya que la estructura mecánica que elevaba los radares era básica.
- Para este proyecto se realizó una búsqueda bibliográfica para determinar el número mínimo de pruebas necesarias para tener resultados que mostraran una información confiable. Como no había documentación o registros anteriores de experimento similares, el cálculo se hizo sobre estudios que determinan el número mínimo de pruebas necesarias para sistemas nuevos. Esto se realizó ya que la cantidad de pruebas es un factor importante al momento de realizar el proyecto; si eran pocas, los resultados no mostrarían una información confiable. Por otro lado, si eran muchas hubiese tomado demasiado tiempo implementarlas.
- Las pruebas realizadas en este proyecto estuvieron sometidas bajo un protocolo de pruebas con el fin de tener una estandarización de los resultados para que cualquier persona que trabaje con alguno de estos radares tenga una estimación de su respuesta frente a los obstáculos estudiados.
- La tarjeta de adquisición STEMLab Red pitaya tiene una velocidad de adquisición máxima de 125MS/s y las API del fabricante simplifican el desarrollo del programa. Se aprende a establecer conexión SSH y comandos en sistema operativo Linux que hoy en día son muy importantes para redes de comunicación. En la referencia (52) se encuentra la URL del blog en el que se escribieron entradas donde se describieron las características, el uso, la forma de programación y aplicaciones de la tarjeta. Dentro del blog se encuentran tutoriales para que cualquier persona de la comunidad hispana empresarial o académica que desarrolle o investigue con esta tarjeta pueda familiarizarse con ella en un tiempo corto.
- La realización de la práctica profesional es un complemento ideal para la formación académica, ya que además de permitir el descubrimiento del trabajo como profesional, ayuda a incorporar hábitos propios del mercado laboral. Lo más importante es la inmersión en el mundo laboral, en donde se obtienen beneficios como la aplicación de conocimientos teóricos a la práctica, el conocimiento de la dinámica de una empresa real y de personas experimentadas que trabajan en el mismo campo de acción, el descubrimiento del trabajo en equipo y la adquisición de experiencia laboral formal.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. SUPERVIGILANCIA. Estado del Sector de Vigilancia y Seguridad Privada en Colombia. *Supervigilancia*. 2014. Conocer las cifras del sector de Vigilancia y Seguridad Privada ayuda a la entidad, a las empresas y las personas relacionadas con este sector a tomar decisiones acertadas respecto al día a día y al futuro, para poder prestar un mejor servicio a la sociedad y al país
2. ALCALDÍA DE VILLAVICENCIO. Economía. [online]. [Accessed 16 November 2018]. Available from: <http://www.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Economia.aspx>
3. PARDO, Clara Inés. Los retos en ciencia y tecnología para Colombia después del ingreso a la Oede | Economía | Portafolio. [online]. [Accessed 16 November 2018]. Available from: <https://www.portafolio.co/economia/los-retos-en-ciencia-y-tecnologia-para-colombia-despues-del-ingreso-a-la-ocde-518437>
4. NOTICIAS INFODEFENSA AMÉRICA. La Fuerza Aérea colombiana incorporará el radar Tader de Codaltec el 29 de marzo. [online]. [Accessed 19 November 2018]. Available from: <https://www.infodefensa.com/latam/2017/03/23/noticia-colombia-ministerio-defensa-colombiano-entregara-fuerza-aerea-radar-tader-fabricado.html>
5. HOLPP, Wolfgang. The Century of Radar. . 2006. P. 1–27.
6. SKOLNIK, M. Role of radar in microwaves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. March 2002. Vol. 50, no. 3, p. 625–632. [Accessed 19 November 2018]. DOI 10.1109/22.989947. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/989947/>
7. PUBLISHING INTEGRATED. Aviation theories and other practices. [online]. 2012. [Accessed 18 November 2018]. Available from: <http://navyaviation.tpub.com/14313/css/Figure-3-2-Typical-Air-To-Surface-Guided-Missile-79.htm>
8. 2015 Volkswagen Touareg - Automatic Distance Control (ACC). [online]. [Accessed 18 November 2018]. Available from: https://www.caricos.com/cars/v/vw/2015_volkswagen_touareg/images/43.html

9. MCCOLLUM, John. Waymo's Self-Driving Cars – A New Way Forward In Mobility. [online]. 2017. [Accessed 19 November 2018]. Available from: <http://www.fusionworldwide.net/waymos-self-driving-cars-a-new-way-forward-in-mobility/>
10. BIL, Ryszard, HOLPP, Wolfgang and BACK, A Look. Naval Radar Trends : A Look Back – A Look Forward. . 2015. P. 1–7.
11. SKOLNIK, MERRILL. *Radar Handbook*. 3rd. 2008. ISBN 9780071485470.
12. GONZÁLEZ, José. Nuevas técnicas para sensores radar embarcados en vehículos aéreos no tripulados. *Universidad Politécnica De Madrid*. 2009. P. 240. DOI 10.1161/01.CIR.96.7.2262.
13. CANELO, César; and WALTER, Quiñones. Diseño e implementación de un Sistema de Radar Estático de Corto Alcance de Onda Continua en Frecuencia Modulada para Mediciones de Rango y Velocidad Tesis. . 2015.
14. IEEE STD. 521-2002. eEngineer - Radio Frequency Band Designations. [online]. [Accessed 23 November 2018]. Available from: <http://www.radioing.com/eengineer/bands.html>
15. GONZÁLEZ, Daniel Vargas. *Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
16. WEIDMANN, Wolfgang; InnoSenT. Radar Sensing and Detection of Moving and Stationary Objects. .
17. SIVERSIMA. FMCW Radar Sensors. [online]. 2011. Available from: <http://www.siversima.com/wp-content/uploads/2011/07/FMCW-Radar-App-Notes-Advantages-and-Disadvantages.pdf>
18. CHRISTIAN WOLF. Radar Basics. [online]. [Accessed 26 November 2018]. Available from: [http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency Modulated Continuous Wave Radar.en.html#bsbfm](http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html#bsbfm)
19. KIM, Sangdong, KIM, Bong-seok, OH, Daegun and LEE, Jonghun. An Effective Pre-processing Technique for Robust ESPRIT-Based Single-Tone Frequency Estimation against an I/Q Mismatch. *Elektronika ir Elektrotechnika* [online]. 2015. Vol. 21, no. 6. DOI 10.5755/j01.eee.21.6.13757. Available from: <http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/13757>
20. TUJAKA, S. On frequency stability of transmitter in LFMCW MTD radar. In : *12th International Conference on Microwaves and Radar. MIKON-98. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.98EX195)* [online]. Telecommun. Res. Inst, p. 776–780. [Accessed 26 November 2018]. ISBN 83-906662-0-0. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/742825/>
21. STOVE, A.G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing* [online]. 1992. Vol. 139, no. 5, p. 343. [Accessed 26 November 2018]. DOI 10.1049/ip-f-2.1992.0048. Available from: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-f-2.1992.0048>
22. JIMÉNEZ, José. *NUEVAS TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE SEÑAL PARA SISTEMAS RADAR DE ALTA RESOLUCIÓN Y BAJA PROBABILIDAD DE INTERCEPTACIÓN*. Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
23. SKOLNIK, Merrill I. *Radar Handbook* [online]. Second Edi. Boston, Massachusetts : McGraw-Hill, 1990. ISBN 007057913X. Available from: <http://www.irricheck.co.za/?p=280>

24. KEYSIGHT EESOF EDA. Automotive FMCW Radar System Design using 3D Framework for Scenario Modeling. [online]. 2017. Available from: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1063EN.pdf>
25. NATIONAL INSTRUMENTS. mmWave Design Plays a Driving Role in ADAS Several radar types play key roles in making vehicles. .
26. GRECO, Maria. Automotive Radar. [online]. 2007. P. 16-1-16–10. DOI 10.1201/9781420006711.ch16. Available from: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420006711.ch16>
27. WALLIUS, Annina. La exploración por radar en Finlandia promete a las personas con discapacidad visual más facilidad para moverse. [online]. [Accessed 26 January 2019]. Available from: <https://yle.fi/uutiset/3-9387614?origin=rss>
28. ALARCÓN, Ricardo. *Diseño y fabricación de amplificadores de microondas de bajo ruido para su aplicación en radioastronomía*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2006.
29. POZAR, David M. *Microwave Engineering*. 4th Editio. 2012.
30. PÉREZ, Jordi Marco. *Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas* [online]. 2015. Available from: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/62838/MARCO - Desarrollo de umbrales adaptativos CFAR y de mapas de clutter para radares aeronáuticos.pdf?sequence=3>
31. NAVAL AIR SYSTEMS COMMAND. *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook* [online]. 1999. ISBN 9781304250797. Available from: <http://www.stormingmedia.us/99/9972/A997254.pdf>
32. CENTER, Space and Naval Warfare Systems. *Perimeter Security Sensor Technologies Handbook*. North Charleston, 1998.
33. TOMÁS GUZMÁN; YOLANDA PARRA. *A SHORT-RANGE, LOW-COST RADAR SYSTEM DEVELOPMENT TO MEASURE SPEED AND DISTANCE*. Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
34. RFBEAM MICROWAVE GMBH. K-LC6 Radar Transceiver. [online]. 2012. [Accessed 24 January 2019]. Available from: https://www.rfbeam.ch/files/products/12/downloads/Datasheet_K-LC6.pdf
35. GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE SENSORES GIDS. Qué es la Red Pitaya y por qué nos interesa para el procesamiento de señales en sensores. [online]. [Accessed 29 November 2018]. Available from: <https://radaresensores.wordpress.com/2018/05/28/que-es-la-red-pitaya/>
36. RED PITAYA. Red Pitaya Hardware Specifications V1.0.1. [online]. [Accessed 25 January 2019]. Available from: https://www.galagomarket.com/datasheet/redpitaya_hardware_specifications.pdf
37. KOIVUMÄKI, Pasi. Triangular and Ramp Waveforms in Target Detection with a Frequency Modulated Continuous Wave Radar. . 2017.
38. ON SEMICONDUCTOR. MC33202 Low Voltage , Rail - to - Rail Operational Amplifiers. *Mc33201*. 2018.
39. RFBEAM MICROWAVE GMBH. Typical Doppler Signal Amplifier. [online]. 2012. [Accessed 25 January 2019]. Available from: https://logosfoundation.org/ii/Radar_2017/AN-04_TypicalSignalAmp.pdf

40. EDIMAX. EW-7811Un N150 Wi-Fi Nano USB Adapter. [online]. 2015. [Accessed 5 February 2019]. Available from: https://www.edimax.com/edimax/mw/cufiles/files/download/datasheet/EW-7811Un_Datasheet_English.pdf
41. RAMÍREZ DARÍO. Fuentes de alimentación. [online]. [Accessed 5 February 2019]. Available from: http://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011-Fuentes_de_alimentacion.pdf
42. PICCININNO, ANDRÉS. *QT Mobile: compilación cruzada para distintos sistemas operativos móviles* [online]. Universitat Politècnica de València, 2015. Available from: <https://riunet.upv.es/handle/10251/48263>
43. CODALTEC. GIDS Grupo de Investigación y Desarrollo en Sensores. [online]. [Accessed 10 February 2019]. Available from: <https://radaresysensores.wordpress.com/>
44. RED PITAYA STEMLAB 0.97 DOCUMENTATION. Remote control (Matlab, Labview, Scilab or Python). [online]. [Accessed 11 February 2019]. Available from: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/appsFeatures/remoteControl/remoteControl.html>
45. DYNAMO ELECTRONICS. 4WD2 Plataforma robótica 4x4 configurable. [online]. [Accessed 11 February 2019]. Available from: <https://www.dynamoelectronics.com/plataformas/15-4wd2-plataforma-robotica-4x4-configurable.html>
46. INSTRUCTABLES. L298 Dual H-Bridge Motor Driver User ' s Guide. [online]. [Accessed 11 February 2019]. Available from: <https://cdn.instructables.com/ORIG/FCN/YABW/IHNTEND4/FCNYABWIHNTEND4.pdf>
47. TORRES, V L and G, J M. Uso de Simulink y Arduino para Practicas de Roboticas. *Actas de las XXXV Jornadas de Automática VALENCIA*. 2014. P. 2–3.
48. ARDUINO CHILE. ¿Qué es Arduino? [online]. [Accessed 11 February 2019]. Available from: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
49. GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO. Product Data Sheet: HC-06. [online]. 2006. [Accessed 11 February 2019]. Available from: http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/HC-06_Wavesen.pdf
50. LOZANO-RIVAS, William Antonio. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE OBSERVACIONES EN INVESTIGACIÓN, OBVIANDO LAS ESTIMACIONES DE LA VARIANZA DE DATOS. . 2011. P. 54–61.
51. PARTIDA, José Tomás González and GARCÍA, Mateo Burgos. Señales y Sistemas. *Cátedra Innova*. 2011.
52. GIDS, Grupo de Investigación y Desarrollo en Sensores. Radares y Sensores. [online]. [Accessed 31 January 2019]. Available from: <https://radaresysensores.wordpress.com/>

11. ANEXOS

Anexo A: Compromiso de Confidencialidad CODALTEC.

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 1 de 4

(Lugar y Fecha)

AUTORIZACIÓN PARA EL ACCESO A INFORMACIÓN CLASIFICADA N° _____/

YO _____ identificado con documento No. _____ de _____ quien en adelante se denominará "La Parte Receptora", manifiesto que me encuentro debidamente facultado para celebrar el presente ACUERDO y me COMPROMETO A GUARDAR CONFIDENCIALIDAD de todos los procesos, procedimientos, actividades, proyectos que se adelanten de investigación, desarrollo e innovación de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa. Ello incluye datos, diseños, fotografías, dibujos, especificaciones de software, programas de software y muestras entre otros que deba conocer con ocasión de mis funciones.

Para efectos de este compromiso la Corporación de Alta Tecnología Para la Defensa será "La parte Reveladora".

Por el término _____ desde la suscripción de este COMPROMISO mantendré confidencialidad de toda la información que adquiera de cualquier manera y que su uso será exclusivo para la tarea u objetivo asignado conforme las funciones de la Dirección del Proyecto y no será para mi beneficio o propósito personal o de un tercero. Me comprometo a revelar información únicamente a los empleados y terceros que autoricen mis superiores e informaré a quien le revele información de la CONFIDENCIALIDAD sobre la misma.

También me comprometo a mantener a salvo cualquier dibujo, documento, muestra, proceso, datos y a no reproducir ni modificar dichos elementos que pongan en riesgo el proyecto o investigación en curso y las creaciones amparadas por la propiedad intelectual.

Cualquier vulneración de confidencialidad la comunicaré en forma inmediata a mi superior que tenga bajo su cargo la Dirección del Proyecto _____.

Declaro conocer la Política Ministerial establecida en la Directiva Permanente No.19 de 2008 o norma que la modifique, que establece: "...el titular de los derechos de propiedad intelectual y demás derechos sobre las Creaciones y los Activos Intangibles creados o desarrollados por sus funcionarios en ejercicio de sus funciones o con informaciones conocidas o utilizadas para ello,..." serán de propiedad del Ministerio de Defensa-CODALTEC

Igualmente me comprometo a cumplir con las siguientes Clausulas:

CLÁUSULA PRIMERA - OBLIGACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD: En cumplimiento de la obligación de confidencialidad, la Parte Receptora deberá:

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 2 de 4

- a) Garantizar la más estricta reserva respecto de la información financiera, técnica, bases de datos, proveedores, *know how*, entre otros, entregada por la Parte Reveladora en el marco mencionado, y advertir de dicho deber de confidencialidad y secreto a cualquier persona que por su relación con él, deba tener acceso a dicha información para el correcto cumplimiento de sus obligaciones.
- b) Abstenerse de reproducir, modificar, hacer pública o divulgar a terceros la información objeto del presente acuerdo, sin previa autorización escrita y expresa de la parte Reveladora.
- c) Adoptar, respecto de la información objeto de este acuerdo, las medidas de seguridad que garanticen la confidencialidad y no divulgación de la información entregada por parte de la parte Reveladora.

CLÁUSULA SEGUNDA - CONSECUENCIAS DE INCUMPLIMIENTO: Quién firma el presente acuerdo de confidencialidad, se sujetará a través de la suscripción del presente compromiso, a las acciones legales que la parte Reveladora pueda ejercer frente al incumplimiento del mismo, de esta manera si la parte Reveladora demuestra que con su actuación se vulneran los derechos, podrá ejercer las acciones civiles, penales y administrativas que le permitan restablecer su situación y la indemnización del daño causado según lo determinen las autoridades competentes que conozcan de las acciones legales que se adelanten.

CLÁUSULA TERCERA – DURACIÓN: La Parte Receptora de la información se compromete a mantener el compromiso de confidencialidad respecto a la información y material entregado por la Parte Reveladora durante el periodo de 5 años o hasta tanto se acuerde que se hará pública total o parcialmente.

CLAUSULA CUARTA - INFORMACION SOBRE LA QUE NO RESULTA APLICABLE LA CONFIDENCIALIDAD

La obligación de confidencialidad que asume la Parte Receptora no alcanza a aquella información que:

- 4.1 *Sea de dominio público;*
- 4.2 *Se encuentre en posesión de La Parte Receptora o de terceros con anterioridad a la celebración del presente acuerdo de confidencialidad, que sea de conocimiento público y siempre que la misma se haya obtenido de manera lícita;*
- 4.3 *Aquella que por mandato judicial o administrativo deba ser divulgada;*
- 4.4 *Aquella que fuera de conocimiento de las autoridades competentes y entidades supervisoras y que tengan carácter de información pública; y,*
- 4.4 *Toda aquella información que por intermedio de analistas económicos o instituciones financieras se pueda obtener.*

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 3 de 4

CLÁUSULA QUINTA - SOLUCIÓN DE CONFLICTOS: En caso de cualquier conflicto o discrepancia que pueda surgir en relación con la interpretación y/o cumplimiento del presente acuerdo, las partes se someten expresamente a lo dispuesto por la ley colombiana vigente.

Suscribo el presente COMPROMISO en mi calidad de empleado CODALTEC, en dos (2) ejemplares en la ciudad de _____ a los ___ días del mes de _____ de 201_

Certifico haber sido notificado sobre las implicaciones jurídicas que tipifica la divulgación no autorizada de información clasificada, de acuerdo a la legislación vigente y su sanción penal y/o disciplinaria. Como rezan al respaldo de la hoja.

 Post-firma
 Firma (GRADO, NOMBRE Y APELLIDOS COMPLETOS)
 Documento de Identificación (cédula, pasaporte)

Fotografía



Huella



PROMESA DE RESERVA



Fundamento Jurídico –

Código Penal (Ley 599 de 2000) Artículos 194, 196, 308 y 463.

CÓDIGO PENAL (Ley 599 de 2000). TITULO X, DELITOS CONTRA EL ORDEN ECONOMICO SOCIAL

CAPITULO PRIMERO, Del acaparamiento, la especulación y otras infracciones; Artículo 308. Violación de reserva industrial o comercial. El que emplee, revele o divulgue descubrimiento, invención científica, proceso o aplicación industrial o comercial, llegados a su conocimiento por razón de su cargo, oficio o profesión y que deban permanecer en reserva, incurrirá en prisión de dos (2) a cinco (5) años y multa de veinte a dos mil (2.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

En la misma pena incurrirá el que indebidamente conozca, copie u obtenga secreto relacionado con descubrimiento, invención científica, proceso o aplicación industrial o comercial.

La pena será de tres (3) a siete (7) años de prisión y multa de cien (100) a tres mil (3.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes, si se obtiene provecho propio o de tercero.

CAPITULO SEGUNDO, De los delitos contra la seguridad del Estado

Artículo 463. Espionaje. El que indebidamente obtenga, emplee o revele secreto político, económico o militar relacionado con la seguridad del Estado, incurrirá en prisión de cuatro (4) a doce (12) años.

CÓDIGO PENAL (Ley 599 de 2000) Titulo III Capítulo VII Artículo 194, DIVULGACION Y EMPLEO DE DOCUMENTOS RESERVADOS. El que en provecho propio o ajeno o con perjuicio de otro divulgue o emplee el contenido de un documento que deba permanecer en reserva, incurrirá en multa, siempre que la conducta no constituya delito sancionado con pena mayor.

Artículo 196, VIOLACION ILICITA DE COMUNICACIONES O CORRESPONDENCIA DE CARACTER OFICIAL. El que ilícitamente sustraiga, oculte, extravíe, destruya, intercepte, controle o impida comunicación o correspondencia de carácter oficial, incurrirá en prisión de tres (3) a seis (6) años. La pena descrita en el inciso anterior se aumentará hasta en una tercera parte cuando la comunicación o la correspondencia esté destinada o remitida a la Rama Judicial o a los organismos de control o de seguridad del Estado.

CÓDIGO DE PROCEDIMIENTO PENAL. (Ley 906 de 2003) **Artículo 383 – OBLIGACIÓN A RENDIR TESTIMONIO,** Toda persona está obligada a rendir, bajo juramento, el testimonio que se le solicite en el juicio oral y público o como prueba anticipada, salvo las excepciones constitucionales y legales.

Artículo 385. EXCEPCIONES CONSTITUCIONALES, Nadie podrá ser obligado a declarar contra sí mismo o contra su cónyuge, compañera o compañero permanente o parientes dentro del cuarto grado de consanguinidad o civil, o segundo de afinidad

MANUAL DE CONTRAINTELIGENCIA FF.MM. 2-6 Reservado Segunda Edición de 2002. Segunda Parte. Seguridad Militar. Capítulo I sección C. establece los grados para la clasificación de Seguridad de los documentos e información militar: Ultrasecreto – Secreto – Reservado – Confidencial y Restringido

Anexo B: Software de generación de la señal de transmisión en C

```
1. #include <stdio.h>
2. #include <stdlib.h>
3. #include "rp.h"
4.
5.     uint32_t buff_size = 16384;
6.     void gen_rampa(void);
7.
8. int main(int argc, char **argv){
9.
10.     /* Print error, if rp_Init() function failed */
11.     if(rp_Init() != RP_OK){
12.         fprintf(stderr, "Rp api init failed!\n");
13.     }
14.     gen_rampa();
15.
16.     rp_Release();
17.     return 0;
18. }
19.
20. void gen_rampa(void) {
21.
22.     int frecuencia_de_operacion=300.0; /*En Hz*/
23.
24.
```

```

25.     float *y = (float *)mal-
        loc(buff_size * sizeof(float));
26.     for (int i=0; i<buff_size; ++i){
27.         y[i] = 0.000054931640625*i + 0.1;} /*Ecuación de
28.     la recta establecida*/
29.     rp_GenWaveform(RP_CH_1, RP_WAVEFORM_ARBITRARY);
30.     rp_GenArbWaveform (RP_CH_1, y, buff_size);
31.     rp_GenAmp(RP_CH_1, 1);
32.     rp_GenFreq(RP_CH_1, frecuencia_de_operacion);
33.     rp_GenOutEnable(RP_CH_1);
34.
35.     free(y); /*libera memoria*/
36. }

```

Anexo C: Software de adquisición y procesamiento radar en MATLAB

```

1. %%Declaración de variables constantes
2. clear all
3. close all
4.
5. fs=122.070e3; %freq de muestreo 122ksps/s
6. t=(0:1/fs:(n*(1/fs)-(1/fs)));
7. buffer_size= 16384;
8. maxsignals=40; %Número de señales I/Q visualizadas con un tamaño de
    buffer máximo y frecuencia de muestreo 122ksps/s
9. signals= 5; %Número de señales I/Q que se quieren visualizar

```

```

10.     n=(buffer_size/maxsignals)*signals; %Número de muestras re-
queridas para visualizar las señales I/Q deseadas
11.     buscapicos= 0.9*(n/signals);
12.     c=3e8;      % Velocidad de la luz
13.     bw= 249e6; % Ancho de banda calculado del módulo radar
14.     rrf= 300;  % Frecuencia de repetición de rampas
15.     memoria=[];
16.
17.     baj = [-0.00232428296804162 -0.00364298206752849 ...
18.           -0.00558418276187884 -
0.00552413528757801 0.00109499487755636 ...
19.           0.0185937004830628 0.0482875040468046 0.0866238863795938 ...
20.           0.125426418548709 0.154444598700106 0.16520896009839 0.154444598700
106 ...
21.           0.125426418548709 0.0866238863795938 0.0482875040468046 ...
22.           0.0185937004830628 0.00109499487755636 -
0.00552413528757801 ...
23.           -0.00558418276187884 -0.00364298206752849 -
0.00232428296804162]; %Coeficientes de filtro pasa bajas diseñado
con fc 6000 Hz
24.
25.     alt= [ -0.000261900082481223 -0.000335718166418531 ...
26.           -0.000549856373694876 -0.000883461554262073 -
0.00130394453316956 ...
27.           -0.00177017264656589 -0.00223650300074239 -
0.00265726041832205 ...
28.           -0.00299122013219952 -
0.00320565466674525 0.996982313339947 ...
29.           -0.00320565466674525 -0.00299122013219952 -
0.00265726041832205 ...
30.           -0.00223650300074239 -0.00177017264656589 -
0.00130394453316956 ...
31.           -0.000883461554262073 -0.000549856373694876 -
0.000335718166418531 ...
32.           -0.000261900082481223]; %Coeficientes del filtro pasa
alta diseñado con fc 250 Hz
33.
34.     taux= (length(baj)+length(alt)):1:n-1; %No se toman en cuenta
los primeros digitos de los filtros
35.     Nfft=2^16; %Longitud de la FFT
36.     f_hz= (-Nfft/2:Nfft/2-1)*(fs/Nfft);
37.     espectrosuma= zeros(1,Nfft);
38.
39.     % Definición de Red Pitaya como objeto TCP/IP y conexión al
host
40.
41.
42.     IP= '192.168.0.189'; % Ingresar la IP de la Red Pitaya
43.     port = 5000;
44.
45.     tcpipObj = tcpip(IP, port);
46.     tcpipObj.InputBufferSize = tamano_buffer*2;
47.     fopen(tcpipObj);
48.     tcpipObj.Terminator = 'CR/LF';

```

```

49.     flushinput(tcpipObj);
50.     flushoutput(tcpipObj);
51.
52.
53.     %% Definición de los parámetros para la primera adquisición
54.
55.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:RST');
56.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:DEC 1024');    %1024 corresponde a una
frecuencia de muestro de 122.07 kHz
57.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:TRIG:LEV 0'); %Establece nivel de tri-
gger en 0
58.     fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN:DIR OUT,DIO5_N'); % Declara DIO5_N
como entrada para controlar Led Verde/baja distancia
59.     fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN:DIR OUT,DIO6_N'); % Declara DIO6_N
como entrada para controlar Led Azul/media distancia
60.     fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN:DIR OUT,DIO7_N'); % Declara DIO7_N
como entrada para controlar Led Amarillo/alta distancia
61.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:SOUR1:GAIN HV'); %Se declara el canal 1
en High Voltage, debido a que el voltaje es mayor a 1 V
62.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:SOUR2:GAIN HV'); %Se declara el canal 2
en High Voltage, debido a que el voltaje es mayor a 1 V
63.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:TRIG:DLY 0');    %Establece un tiempo
de retardo "Delay" en 0
64.
65.     % Inicio de la primera adquisición de datos
66.
67.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:START');
68.     % Después de que inicia la adquisición se debe esperar un
tiempo para
69.     % adquirir siempre m
70.
71.     pause(n/fs)
72.
73.     fprintf(tcpipObj,'ACQ:TRIG CH1_PE'); %Establece el trigger en
el flanco positivo de la señal en el canal 1
74.
75.     % Espera por el trigger
76.     % Hasta que el trigger está, empieza a adquirir.
77.     % Ctrl+C para detener el código.
78.
79.     while 1
80.         trig_rsp=query(tcpipObj,'ACQ:TRIG:STAT?');
81.
82.         if strcmp('TD',trig_rsp(1:2))
83.
84.             break
85.
86.         end
87.     end
88.
89.     signal_str=query(tcpipObj,'ACQ:SOUR1:DATA:LAT:N? 2048');
90.     signal_str_2=query(tcpipObj,'ACQ:SOUR2:DATA:LAT:N? 2048');
91.
92.     fclose(tcpipObj);
93.
94.     I=str2num(signal_str(1,2:length(signal_str)-3));
95.     Q=str2num(signal_str_2(1,2:length(signal_str_2)-3));

```

```

96.
97.     %Finaliza primera adquisición
98.     %%
99.     while 1
100.
101.         %% Conexión con Red Pitaya y adquisición continua de datos.
102.         fopen(tcpipObj);
103.
104.         tcpipObj.Terminator = 'CR/LF';
105.
106.         flushinput(tcpipObj);
107.         flushoutput(tcpipObj);
108.
109.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:RST');
110.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:DEC 1024');
111.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:LEV 0');
112.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:SOUR1:GAIN HV');
113.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:SOUR2:GAIN HV');
114.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:DLY 0');
115.
116.
117.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:START');
118.
119.         pause(n/fs)
120.         fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG CH1_PE');
121.
122.
123.         %% Etapa de filtrado
124.
125.         %Filtro Pasa bajo (LPF)
126.         Si=filter(baj,1,I);
127.         Sq=filter(baj,1,Q);
128.         Si= Si(length(baj):end-1);
129.         Sq= Sq(length(baj):end-1);
130.         %Filtro Pasa Alto (HPF)
131.         Sii=filter(alt,1,Si);
132.         Sqq=filter(alt,1,Sq);
133.         Sii= Sii(length(alt):end-1);
134.         Sqq= Sqq(length(alt):end-1);
135.
136.         %Sección de código para encontrar los picos de cada señal I y
137.         Q
137.         [pks,locsi]= findpeaks(Sii,taux, 'MinPeakDistance',buscapi-
138.         cos);
138.         [pks1,locsq]= findpeaks(Sqq,taux, 'MinPeakDistance',buscapi-
139.         cos);
139.
140.         %Alinear las señales I y Q ya que la adquisición no se hace
141.         simultánea
141.         deltaMuestras=locsi(1)-locsq(1);
142.         if deltaMuestras<=0
143.             Sqq1=[Sqq(abs(deltaMuestras)+1:end) zeros(1,abs(delta-
144.             Muestras))];
144.         else
145.             Sqq1=[zeros(1,abs(deltaMuestras)) Sqq(1:end-(abs(delta-
146.             Muestras)))]];
146.         end

```

```

147.
148.     % figure(6)
149.     % plot(Sii);
150.     % hold on
151.     % plot(Sqq1);
152.     % hold off %Descomentar si se quieren ver las señales I/Q
    luego de ser
153.     % alineadas
154.
155.     clear matrix_signal_i matrix_signal_q
156.
157.     %Sección de código para cortar la parte útil de la señal I y
    Filtro DC
158.
159.     for i=1:(length(locsi)-1)
160.         matrix_signal_i(i,:) = Sii(locsi(i)+ceil(0.15*buscapicos):locsi(i)+ceil(0.82*buscapicos));
161.         vmeddi= mean(matrix_signal_i(i,:));
162.         matrix_signal_i(i,:)= matrix_signal_i(i,:)-vmeddi;
163.         %         figure(2)
164.         %         plot(matrix_rampasi(i,:));
165.         %         hold on
166.         %         figure(1)
167.         %         plot(matrix_rampasi(i,:))
168.         %         hold on %Descomentar si se quiere ver la señal I re-
    cortada
169.     end
170.     hold off
171.
172.     %Sección de código para cortar la parte util de la señal Q y
    Filtro DC
173.     for i=1:(length(locsi)-1)
174.         matrix_signal_q(i,:) = Sqq1(locsi(i)+ceil(0.15*buscapicos):locsi(i)+ceil(0.82*buscapicos));
175.         vmeddq= mean(matrix_signal_q(i,:));
176.         matrix_signal_q(i,:)= matrix_signal_q(i,:)-vmeddq;
177.         %         figure(3)
178.         %         plot(matrix_rampasq(i,:));
179.         %         hold on
180.         %         plot(matrix_rampasq(i,:))
181.         %         axis([0 380,-1 1])
182.         %         hold on %Descomentar si se quiere ver la señal Q re-
    cortada
183.     end
184.     hold off
185.
186.
187.     f_hz= (0:Nfft/2-1)*(fs/Nfft);
188.
189.     %Sección de código de procesamiento radar
190.
191.     complex_matrix= matrix_signal_i + 1i*matrix_signal_q; %Suma
    compleja de señales I/Q
192.     rampa=zeros(4,length(complex_matrix));
193.     Se=zeros(1,length(complex_matrix));
194.     espectrosuma=zeros(1,Nfft);
195.     ventana= hamming(size(complex_matrix,2))';

```

```

196.
197.     %Enventanado y Zero Padding
198.
199.     for i=1:size(complex_matrix,1)
200.         %matriz_rampas(i,:);
201.         Se=ventana.*complex_matrix(i,:);
202.         Sep=[Se zeros(1,Nfft-length(Se))];
203.         espectro=fft(Sep,Nfft);
204.         espectrosoma= espectrosoma+espectro;
205.         %         figure(9)
206.         %         plot(abs(Se));
207.         %         hold on
208.         %         plot(abs(matriz_rampas(i,:)));
209.         %plot(abs(espectrosoma))
210.
211.     end
212.
213.     hold off
214.
215.     % Sección de código para visualizar el espectro de las seña-
216.     % les I/Q y
217.     % expresarlo en términos de distancia en metros
218.     solvervalue= 0.776699027076089; %Ajuste realizado dado que la
219.     % señal es recortada
220.     dist= ((f_hz*c)/(2*bw*rrf))*solvervalue; %Se pasa la fre-
221.     % cuencia de batido a unidades de distancia (m)
222.     distmax= 11;
223.     dist= dist(1:1:4000);
224.     fftval=fftshift(abs(espectrosoma));
225.     fftval= fftval((Nfft/2)+1:end);
226.     zz= (1:1:ceil(distmax/((dist(2)-dist(1)))).*(8/ceil(distmax/
227.     % ((dist(2)-dist(1))));
228.     fftvall= fftval.*1;
229.     fftvall= fftvall.^2;
230.     fftvall= fftvall(1:1:4000);
231.     figure(3)
232.     plot(dist,ftvall,'LineWidth',3);
233.     axis([0 8, 0 7000])
234.     ylabel('Amplitud')
235.     xlabel('Distancia(m)')
236.     legend('I')
237.     hold off
238.
239.     [pks2,locs2]= findpeaks(fftvall,dist,'MinPeakDistance',4);
240.
241.     if (locs2(1)>=0) & (locs2(1)<1) & (pks2(1)>850) %Piso de
242.     % ruido LED verde/cerca 0-1 m: aprox 850
243.
244.         fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN DIO5_N,1');
245.         fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN DIO6_N,0');
246.         fprintf(tcpipObj,'DIG:PIN DIO7_N,0');
247.
248.     elseif (locs2(1)>=1) & (lo-
249.     % cs2(1)<2) & (pks2(1)>450) %Piso de ruido LED azul/media 1-2 m:
250.     % aprox 350
251.

```

```

246.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO5_N,0');
247.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO6_N,1');
248.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO7_N,0');
249.
250.         elseif (locs2(1)>=2) & (lo-
cs2(1)<3) & (pks2(1)>350) %Piso de ruido LED amarillo/lejos 2-3 m:
aprox 350
251.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO5_N,0');
252.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO6_N,0');
253.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO7_N,1');
254.
255.         else
256.
257.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO5_N,0');
258.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO6_N,0');
259.         fprintf(tcpipObj, 'DIG:PIN DIO7_N,0');
260.     end
261.     fprintf('se detectó blanco en: %.2f metros \n', locs2(1))
262.
263.     espectrosuma=0;
264.
265.     while 1
266.         trig_rsp=query(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:STAT?');
267.
268.         if strcmp('TD',trig_rsp(1:2)) % Read only TD
269.
270.             break
271.
272.         end
273.     end
274.
275.     signal_str=query(tcpipObj, 'ACQ:SOUR1:DATA:LAT:N? 2048');
276.     signal_str_2=query(tcpipObj, 'ACQ:SOUR2:DATA:LAT:N? 2048');
277.
278.     I=str2num(signal_str(1,2:length(signal_str)-3));
279.     Q=str2num(signal_str_2(1,2:length(signal_str_2)-3));
280.
281.     fclose(tcpipObj)
282.
283.     end

```

Anexo D: Tablas con los datos obtenidos para cada obstáculo. (N.D= No detectó)

OBSTÁCULO: PERSONA				OBSTÁCULO: RAMA				OBSTÁCULO: PARED				OBSTÁCULO: SILLAS			
	DISTANCIA(m)				DISTANCIA(m)				DISTANCIA(m)				DISTANCIA(m)		
prueba	led1	led2	led3	prueba	led1	led2	led3	prueba	led1	led2	led3	prueba	led1	led2	led3
1	0,8	1,45	N.D	1	N.D	N.D	2,5	1	0,6	1,8	3	1	0,5	1,2	2,75
2	0,4	1,1	2,8	2	0,2	N.D	N.D	2	0,8	1,9	2,8	2	0,25	1,2	2,2
3	0,8	1,7	2,7	3	0,35	N.D	N.D	3	1	1,5	2,7	3	N.D	1,25	2,95
4	0,7	1,35	2,4	4	N.D	N.D	N.D	4	0,6	1,5	2,8	4	0,2	1,5	2,15
5	0,9	1,75	N.D	5	N.D	N.D	N.D	5	1	1,8	2,8	5	0,9	1,5	2,6

6	0,65	1,75	2,1
7	0,2	N.D	2,6
8	0,9	N.D	2,3
9	0,9	1,5	2,5
10	0,5	1,5	2,05
11	1	1,8	2,6
12	0,7	1,4	2,8
13	0,5	N.D	N.D
14	0,9	1,5	2,6
15	0,5	1,85	2,8
16	0,8	N.D	N.D
17	0,8	1,5	2,3
18	0,25	1,8	2,05
19	0,8	1,5	2,35
20	0,6	1,9	2,6
21	0,7	1,4	2,8
22	0,5	N.D	2,8
23	0,4	1,5	2,6
24	0,8	1,8	2,65
25	1	1,7	N.D
26	0,55	1,9	2,8
27	0,5	1,5	2,7
28	0,7	1,75	2,9
29	0,9	N.D	2,35
30	0,65	1,2	2,85
31	0,7	1,7	2,7
32	0,4	1,1	2,8
33	0,8	1,7	2,7
34	0,7	1,35	2,4
35	0,9	1,75	N.D
36	0,65	1,75	2,1
37	0,2	N.D	2,6
38	0,7	1,75	2,9
39	0,8	1,7	2,7
40	0,7	1,35	2,4
41	0,9	N.D	2,35
42	0,65	1,2	2,85
43	0,7	1,7	2,7
44	0,4	1,1	2,8
45	0,9	1,75	N.D
46	0,65	1,75	2,1
47	0,8	1,8	2,65
48	1	1,7	N.D
49	0,55	1,9	2,8
50	0,5	1,5	2,05
51	0,9	N.D	2,35

6	N.D	N.D	N.D
7	N.D	N.D	N.D
8	0,9	N.D	2,5
9	N.D	N.D	N.D
10	N.D	N.D	N.D
11	0,35	N.D	N.D
12	0,45	N.D	N.D
13	0,5	N.D	N.D
14	0,85	N.D	N.D
15	0,8	N.D	N.D
16	N.D	N.D	2,6
17	0,4	N.D	N.D
18	0,6	N.D	N.D
19	N.D	1,5	N.D
20	N.D	N.D	N.D
21	N.D	N.D	N.D
22	N.D	N.D	N.D
23	N.D	N.D	N.D
24	N.D	N.D	N.D
25	N.D	N.D	N.D
26	N.D	N.D	N.D
27	0,45	N.D	N.D
28	0,25	N.D	N.D
29	0,6	N.D	N.D
30	N.D	N.D	N.D
31	N.D	N.D	2,7
32	0,7	N.D	N.D
33	0,3	N.D	N.D
34	0,5	N.D	N.D
35	0,2	N.D	N.D
36	0,35	1,4	N.D
37	N.D	N.D	N.D
38	N.D	N.D	N.D
39	N.D	N.D	N.D
40	N.D	N.D	2,8
41	N.D	N.D	N.D
42	N.D	N.D	N.D
43	N.D	N.D	N.D
44	N.D	N.D	N.D
45	N.D	N.D	N.D
46	N.D	N.D	N.D
47	0,45	N.D	N.D
48	0,5	N.D	N.D
49	0,85	1,7	N.D
50	N.D	N.D	N.D
51	N.D	N.D	N.D

6	0,8	1,6	2,7
7	0,9	1,7	3
8	0,5	1,7	3
9	0,9	1,6	2,8
10	0,7	1,9	3
11	0,9	1,6	3
12	1	1,7	3
13	1	1,5	2,8
14	1	1,7	3
15	1	1,6	3
16	1	1,8	2,7
17	1	1,7	2,9
18	0,7	1,8	3
19	0,9	1,7	3
20	0,9	2	2,8
21	0,9	1,6	2,8
22	0,7	1,9	3
23	0,9	1,6	3
24	1	1,7	2,8
25	0,8	1,7	3
26	1	1,6	3
27	0,9	1,8	2,7
28	1	1,7	2,9
29	0,6	1,5	2,8
30	1	1,8	2,8
31	0,8	1,6	2,7
32	0,9	1,7	3
33	0,5	1,7	3
34	0,6	1,5	2,8
35	1	1,8	2,8
36	0,8	1,6	2,7
37	0,9	1,7	3
38	0,5	1,7	3
39	0,9	1,6	2,8
40	0,9	1,6	2,8
41	0,7	1,9	3
42	0,9	1,6	3
43	1	2	3
44	1	1,5	2,8
45	1	1,7	3
46	0,9	1,7	3
47	0,9	2	2,8
48	0,9	1,6	2,8
49	0,8	1,6	2,7
50	0,9	1,7	3
51	0,5	1,7	3

6	1	1,6	2,9
7	0,9	1,1	2,3
8	0,2	1,2	2,2
9	0,7	1,3	2,4
10	0,35	1,1	2,5
11	0,85	1,25	2,7
12	0,9	1,1	2,8
13	0,95	1,1	2,7
14	0,15	1,2	2,2
15	0,9	1,2	2,15
16	0,5	1,3	2,3
17	0,4	1,3	2,8
18	0,9	1,5	2,7
19	0,7	1,2	2,1
20	0,3	1,25	2,7
21	0,25	1,5	2,5
22	0,5	1,6	2,6
23	0,7	1,25	2,3
24	0,95	1,3	2,75
25	0,5	1,1	2,3
26	0,5	1,6	2,9
27	0,3	1,55	2,2
28	1	1,45	2,7
29	N.D	1,6	2,2
30	0,55	1,55	2,5
31	0,5	1,45	2,45
32	0,5	1,7	2,3
33	0,6	1,15	2,6
34	0,3	1,15	3
35	0,5	1,25	2,35
36	0,2	1,2	2,7
37	0,3	1,2	2,5
38	0,2	1,45	2,7
39	0,65	1,15	2,2
40	0,7	1,25	2,3
41	0,95	1,3	2,75
42	0,5	1,1	2,3
43	0,5	1,6	2,9
44	0,6	1,15	2,6
45	0,3	1,15	3
46	0,5	1,25	2,35
47	0,2	1,2	2,7
48	0,3	1,2	2,5
49	0,2	1,45	2,7
50	0,4	1,3	2,8
51	0,9	1,5	2,7

