



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación y puesta en marcha de un radar FMCW de bajo
coste en banda S*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ramón Liaño Cuquerella

DIRECTOR: José María Núñez Ortuño

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación y puesta en marcha de un radar FMCW de bajo
coste en banda S*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El fin de este trabajo es diseñar y construir un radar de onda continua de bajo coste capaz de medir tanto velocidades como distancia a blancos. Su principal aplicación es la experimentación, investigación y docencia en el entorno universitario.

El diseño de este radar se ha basado en una configuración monoestática con dos antenas siendo el receptor de tipo homodino. Se empleará la banda libre de ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) emitiendo a una frecuencia central de 2,4 GHz. La señal de radiofrecuencia transmitida por la antena es generada previamente mediante un VCO que sintetiza la forma de onda a través de un procesador tipo Arduino. La señal recibida es demodulada, amplificada y filtrada por la cadena receptora. Finalmente la señal es muestreada y procesada mediante un ordenador personal. El procesamiento de la señal radar permite obtener perfiles velocidad-tiempo y distancia-tiempo de los blancos.

PALABRAS CLAVE

Radar, Doppler, Arduino, Filtro, Bajo coste

AGRADECIMIENTOS

Al profesor José María Núñez Ortuño por su inestimable ayuda durante el desarrollo de todo el trabajo sacrificando gran parte de su tiempo libre en la consecución del proyecto y sin el cual este trabajo no hubiese salido adelante.

Al Centro de Medidas Electromagnéticas de la Armada (CEMEDEN) por su apoyo y recursos facilitados.

A la secretaria del CUD por la colaboración a la hora de redactar el proyecto.

Contenido

Contenido	6
Índice de Figuras	8
1 Introducción y objetivos	10
1.1 Contextualización.....	10
1.2 Motivación	11
1.3 Objetivos	11
1.4 Organización del trabajo	12
2 Estado del arte	13
2.1 Radar	13
2.1.1 Historia del radar	13
2.1.2 Funcionamiento del radar	14
2.1.3 Radares de Onda Pulsada.....	15
2.1.4 Radar de Onda Continua.....	16
2.2 Cálculos para obtención de distancia y velocidad en radar de onda continua.	18
2.3 Radares de bajo coste comerciales.....	21
2.4 Radares bajo coste no comerciales.....	22
2.4.1 Varios Radares.....	22
2.4.2 Coffee can Radar	23
3 Desarrollo del TFG.....	26
3.1 Investigación y recopilación de información	26
3.2 Diseño y Construcción del radar	27
3.2.1 Funcionamiento del radar	27
3.3 Etapa de transmisión (Generador de rampa, circuito radiofrecuencia y antena)	28
3.3.1 Generador de rampa y pulsos	28
3.3.2 Circuito de radiofrecuencia (transmisión)	32
3.3.3 Antena de transmisión y recepción.....	33
3.4 Etapa de recepción (Circuito radiofrecuencia y etapas de amplificación y filtrado)	34
3.4.1 Circuito de radiofrecuencia (recepción)	34
3.4.2 Filtro de paso bajo y amplificador	35
3.4.3 Alimentación del radar	40
3.5 Equipos utilizados para realizar mediciones	40
3.5.1 Osciloscopio DSO-X-2002-A.....	40
3.5.2 Generador de funciones AFG-2005	41
3.5.3 Fuente de alimentación Tenma 72-8690.....	41

3.5.4 Analizador de espectro HP 8593E	42
4 Resultados / Validación / Prueba.....	43
4.1 PRUEBAS.....	43
4.2 Adquisición de datos	44
4.2.1 Adquisición de la frecuencia Doppler	44
4.2.2 Adquisición de datos para cálculos de distancia.....	45
4.3 Procesamiento e interpretación de los datos	47
4.3.1 Procesamiento para obtención de velocidad y distancia.....	47
5 Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Diagrama de Gantt	56
5.2 Problemas encontrados	57
5.2.1 El filtro / amplificador	57
5.2.2 Generador de rampa/ pulsos	58
5.2.3 Programación y toma de muestras	58
5.3 Contrastación de los resultados.....	58
5.4 Líneas futuras	58
5.4.1 Utilización del radar como material docente	59
5.4.2 Mejoras técnicas	59
5.4.3 Estudio de diferentes señales	59
5.4.4 Mejora.....	59
5.4.5 Radar de onda pulsada	60
5.5 Conclusión personal.....	60
6 Bibliografía.....	61
Anexo I: Código del Arduino	65

Índice de Figuras

Figura 2.1.1: Funcionamiento gráfico radar [5]	14
Figura 2.1.2: Explicación Grafica Sistema Radar Simple [6]	15
Figura 2.1.3: Usos de bandas de frecuencia [8]	17
Figura 2.1.4: Explicación Gráfica del efecto Doppler [9]	17
Figura 2.2.1: Representación gráfica señal en Dientes de Sierra y frecuencia de batido [10]	18
Figura 2.2.2: Señal triangular y frecuencia de batido [10]	19
Figura 2.2.3: Representación gráfica frecuencia de batido [10]	19
Figura 2.3.1: Transceiver RS3400K00 de SIVER SIMA [11]	21
Figura 2.3.2: Single Chip 24GHz Radar Transceiver de Viasat [12]	22
Figura 2.4.1: Sensor de distancia giratorio con pantalla LCD [14]	23
Figura 2.4.2: Coffee Can Radar de Gregory Charvat [3]	24
Figura 3.2.1: Esquema gráfico del radar	28
Figura 3.3.1: Arduino UNO [15]	29
Figura 3.3.2: Gráfico explicación PWM	29
Figura 3.3.3: DAC MCP4725 [18]	30
Figura 3.3.4: Conexiones Arduino-DAC-Divisor de Tensión	31
Figura 3.3.5: Señal triangular y rectangular obtenidas	31
Figura 3.3.6: V vs Freq VCO ZX95-2536C-S+ [19]	32
Figura 3.3.7: Ancho de banda en frecuencia en Analizador de Espectros	33
Figura 3.3.8: Diagrama de radiación de las antenas [26]	34
Figura 3.4.1: Imagen del circuito de radiofrecuencia [19] [20] [21] [23] [24] [25]	35
Figura 3.4.2: Simulación del filtro de paso-bajo con frecuencia de corte en 15KHz [15]	36
Figura 3.4.3: Filtro Sallen Key simple [16]	36
Figura 3.4.4: Recorte de la señal amplificada a nivel de Tierra	37
Figura 3.4.5: Imagen del filtro/ amplificador	37
Figura 3.4.6: Amplificador, Filtro (dos fases) y divisor de tensión	38
Figura 3.4.7: Circuito electrónico amplificador y filtro [31]	39
Figura 3.5.1: Osciloscopio DSO-X-2002-A	40
Figura 3.5.2: Generador de funciones AFG-2005	41
Figura 3.5.3: Fuente de alimentación TENMA 72-8690	41
Figura 3.5.4: Analizador de espectro HP 8593E	42
Figura 4.1.1: Muestra de la frecuencia transmitida por el analizador de espectro	44
Figura 4.2.1: Captura Doppler (Audacity)	45
Figura 4.2.2: Comparación señal transmitida y señal recibida	46

Figura 4.2.3: Captura audio dos canales con Audacity	46
Figura 4.3.1: Captura pantalla empleo Script de dstancia	47
Figura 4.3.2: Velocidad coche en acercamiento, parada y alejamiento	48
Figura 4.3.3: Coche en acercamiento y alejamiento.....	48
Figura 4.3.4: Blanco alejandose andando y vuelta corriendo.....	49
Figura 4.3.5: Persona alejandose y acercandose haciendo paradas.....	50
Figura 4.3.6: Dos blancos corriendo en alejamiento y acercamiento.....	50
Figura 4.3.7: Coche pasando a una distancia de 9 metros del radar.....	51
Figura 4.3.8: Aclaración gráfica FFT para obtener distancia vs tiempo	52
Figura 4.3.9:Aclaración gráfica FFT para obtner distancia vs velocidad.....	54
Figura 5.1.1: Diagrama de Gantt	56

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

El radar concebido a principios del siglo XX ha revolucionado la historia siendo ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones. En una sociedad tecnológicamente avanzada como la que nos rodea es muy difícil encontrar un sector que no se aproveche de los principios de funcionamiento del radar:

- Para mediciones precisas como las utilizadas en medicina, robótica y sensores.
- Para mediciones a más larga distancia como pueden ser sensores de aparcamiento y telemetría.
- Radares de exploración, tanto de superficie como aérea, útil no solamente para detectar contactos sino para ayudar a controlar el tráfico aéreo.
- Imprescindible a la hora de automatizar cualquier sistema.
- Utilidad muy práctica en meteorología para realizar las previsiones
- Abre un enorme abanico de líneas futuras de las que la sociedad se podrá aprovechar.

En este contexto, es fácil de ver que las Fuerzas Armadas se han beneficiado de la evolución de esta tecnología, y concretamente en la Armada, que tiene en el radar una herramienta de gran valor, pues no solo facilita y asegura la navegación sino que además ofrece aspectos tácticos que en sectores como el de la marina mercante no son de utilidad.

Existen muchos tipos de navegación a día de hoy y el radar ha revolucionado en mayor o menor medida cada uno de ellos, influyendo mayormente en:

-La navegación costera, la cual se define como la navegación que se realiza en las proximidades de la costa utilizando puntos geográficos destacados para el posicionamiento ha cambiado drásticamente, combinando las distancias radar junto con las demoras para obtener con ello un posicionamiento mucho más preciso.

-La navegación a estima, la cual se basa en el uso de los sensores disponibles en el buque (entre ellos el radar) para obtener una situación estimada.

-Además en trayectos más largos ha demostrado ser de gran utilidad como medida de seguridad evitando desastres por colisiones entre buques y detección de icebergs y otro tipo de obstáculos que podrían frustrar la navegación.

Uno de los principales atributos del radar es que por primera vez en la historia se podía ver más allá del horizonte, lo que, llevado al terreno de la táctica, es una enorme ventaja. Es por tanto una herramienta fundamental en cualquier buque militar siendo absolutamente primordial un conocimiento básico de radares y muy útil (si no necesario) un conocimiento más amplio en el caso de los oficiales de la armada.

Hasta el momento los encargados del diseño y construcción han sido en el mayor de los casos ingenieros de diferentes especialidades y ramas. Con el actual sistema de estudios se pretende dar una formación científica más a fondo al oficial para que se pueda desenvolver en una Armada cada vez más técnica. Es por tanto lógico pensar que lo más adecuado es que aquellos que van a ser los encargados de utilizarlo sean capaces de entender su funcionamiento de una forma detallada.

Las dos instituciones presentes en la Escuela Naval Militar (El Centro Universitario de la Defensa y la Escuela Naval Militar como tal) aúnan material, instalaciones, formación y esfuerzos imprescindibles en esta formación convirtiendo este trabajo en un proyecto idóneo para ser realizado por un alumno que se va a graduar tanto en la carrera militar de oficial de la armada con en el grado de ingeniería industrial rama mecánica.

1.2 Motivación

Todo surge por la necesidad del CUD disponer de un radar de bajo coste que los alumnos pudiesen fabricar durante las prácticas de la asignatura de Sistemas de Control y Sensores Navales. El sistema debía ser de fácil implementación técnica para un alumno de 5º curso y de bajo coste para poder adquirir varias unidades. El radar de onda continua es técnicamente el más sencillo de fabricar y permite experimentar de forma directa con conceptos como el doppler, resolución, ambigüedad en distancia, etc...

Además de la posible aplicación docente en prácticas y seminarios, puede ser de gran utilidad para la elaboración de futuros proyectos a partir de este primer trabajo.

Surgen otros motivos como demostrar la estrecha vinculación de la ingeniería con la Armada así como su posible aprovechamiento en beneficio de esta. A menor escala esto se ve reflejado en este proyecto por la ayuda recibida por ambas partes para sacar adelante este proyecto, por un lado el CEMEDEM y por otro lado el CUD.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es, la fabricación de un radar de bajo coste en la banda libre de ISM emitiendo a una frecuencia central de 2'4 GHz.

Para cumplir los requisitos de bajo coste, el diseño debe contar con materiales accesibles comercialmente, económicos y disponibles con una mayor rapidez. Para que todo esto sea posible, ha de primar la simpleza en el diseño siendo la gran mayoría de los componentes relativamente básicos.

En cuanto a especificaciones técnicas, son muchos los parámetros a tener en cuenta pero los más importantes son:

- Dimensiones razonables que permitan que sea portable si gran dificultad.
- Capaz de tener un alcance de detección entorno a los 200 metros para la RCS de una persona (1m^2).
- El radar debe tener alimentación única y autónoma.
- El procesamiento de la señal radar ha de ser simple y se podrá obtener con un ordenador.

- Posibilidad de definir los parámetros básicos de transmisión del radar tales como frecuencia de operación, forma de onda transmitida y sus parámetros asociados: duración del pulso, periodo de repetición de pulso, alcance no ambiguo, etc.
- Posibilidad de poder digitalizar la señal en banda base a distintas velocidades y resoluciones.
- Poder almacenar el video radar y procesarlo mediante filtros y algoritmos básicos de procesado radar.

1.4 Organización del trabajo

En primer lugar se realiza una contextualización del proyecto introduciendo brevemente la historia del radar (A. 2.1), centrándose en el radar de onda continua(A 2.1.4)y los ecuaciones de estos radares (A 2.2). Más adelante se dedica un apartado para la contextualización de los radares existentes (A 2.3 y A 2.4)y el enfoque que se le va a dar a este proyecto (A 2.4).

A continuación se lleva a cabo una breve descripción de los componentes que conforman el sistema, explicando la función que tiene cada uno de ellos y el porqué de su elección(A 3.1) conforme se va detallando el proceso de montaje además de los problemas encontrados durante dicho proceso . Se incluye además una breve descripción de los equipos utilizados en el laboratorio(A 3.5).Para hacer esto se dividirá el proyecto en tres etapas : transmisión (A 3.3), recepción(A 3.4) y procesamiento(A 4.3).

Después de definir el montaje se explica cómo se lleva a cabo la adquisición de datos a través del ordenador(A 4.2). Se explican las diferencias entre adquisición de frecuencia Doppler(A 4.2.1) y medida de distancia (A 4.2.2) y una vez hecho esto, como se procede a su procesado para obtener el resultado final (A 4.3).

Por último se presenta una serie de conclusiones sobre el proyecto detallándose los problemas encontrados(A 5.1), la contrastación de objetivos (A 5.2), se establecen unas posibles líneas futuras (A 5.3) y finalmente algunas conclusiones personales (A 5.4).

2 ESTADO DEL ARTE

“Because of radar, astronomers can map the contours of far-off planets, physicians can see images of internal organs, meteorologists can measure rain falling in distant places, air travel is hundreds of times safer than travel by road, long-distance telephone calls are cheaper than postage, computers have become ubiquitous and ordinary people can cook their daily dinners in the time between sitcoms, with what used to be called a radar range.”

– Robert Buderer, *The Invention that Changed the World*

“Gracias al radar, los astrónomos pueden trazar los contornos de los planetas más lejanos, físicos pueden ver imágenes de organismos internos, meteorólogos pueden medir la lluvia que cae en diferentes lugares, los viajes en avión son cien veces más seguros que viajando en coche, llamadas a larga distancia por teléfono son más baratas que el correo, los ordenadores se han vuelto omnipresentes y la gente puede cocinar su cena del día a día entre comedias, con eso que se solía llamar radar”

-Robert Buderer, *“La invención que cambió el mundo”*

2.1 Radar

2.1.1 Historia del radar

Para hablar de los orígenes del radar tenemos que remitirnos a 1864 cuando el científico Heinrich Rudolf Hertz unificó las teorías de Maxwell, Faraday, Ampere y Gauss llegando a la conclusión de que las ondas electromagnéticas se transmitían en espacios libres a la misma velocidad que lo hace la luz, siendo esta una onda con una longitud de onda específica. Esta teoría no fue validada hasta 20 años después cuando consiguió transmitir y recibir a una determinada frecuencia. Este experimento no tuvo un uso específico hasta que Marconi se interesó en él y le dio el uso de transmitir información.

En el año 1917, Nicola Tesla habla sobre los principios del futuro radar. “Por su uso podemos producir a voluntad, de una estación de envío, un efecto eléctrico en cualquier región del mundo en particular; podemos determinar la posición relativa o el curso de un objeto en movimiento, tal como un buque en el mar, la distancia atravesada por el mismo, o su velocidad. [1]

Hasta este momento el espectro electromagnético se utilizaba como un medio para transmitir información y ya se había demostrado con el experimento de Hertz que las ondas transmitidas se

reflejaban en los objetos y se podían recibir de nuevo, habiéndose hecho experimentos llevados a cabo por científicos como Sir Robert Watson-Watt en los que se había conseguido detectar un contacto aéreo a 15 millas y el de los norteamericanos Page y Young en 1936 que consiguieron un alcance de 25 millas con lo que pasaría a la historia por ser el primer radar de onda pulsada de la historia. La relevancia de este logro, reside en que el alcance de este radar sobrepasaba el horizonte visual. [2]

Sin embargo, fue la necesidad de un instrumento que permitiera la detección temprana de contactos durante la Segunda Guerra Mundial lo que impulsó la invención del radar. Durante la etapa de pre-guerra, Inglaterra invirtió en un sistema que fue el primer radar de vigilancia aérea, situándolo en la costa sur y este de Inglaterra, el cual desempeñó un papel fundamental en la guerra por ser superior a los sistemas utilizados por los alemanes. [3]

A día de hoy, en el campo militar el radar ha evolucionado mucho y utilizando muy diversos tipos. Merecen una especial mención los arrays, los cuales fueron inventados durante la segunda guerra mundial pero que, por limitaciones de la tecnología, eran poco precisos, siendo muy utilizados a día de hoy y fundamentales para sistemas como el Aegis y el Patriot (vigilancia aérea y defensa anti misiles). [3]

Sin embargo, pese a sus orígenes militares, el radar ha encontrado su sitio en miles de aplicaciones en el mundo civil. Los meteorólogos utilizan el efecto Doppler para detectar el movimiento de las precipitaciones en la atmosfera, los constructores de automóviles incluyeron el radar en sus vehículos para detectar objetos por la parte trasera del automóvil, los cuerpos de policía para detectar la velocidad de los automóviles, calcular la velocidad de objetos en diversos deportes, etc..... La tecnología radar es extremadamente útil y tiene actualmente muchas otras aplicaciones y líneas futuras en las que investigar. [2]

2.1.2 Funcionamiento del radar

La idea básica detrás del funcionamiento de un radar es muy simple: se transmite una señal, la cual incide en un objeto y es posteriormente recogida por el sistema. Este efecto es muy similar al eco producido por nuestra voz. Para ello los radares utilizan ondas electromagnéticas llamadas también ondas radio de ahí su nombre: *Radio Detection And Ranging* (Sistema de detección y distancia radio) [4]

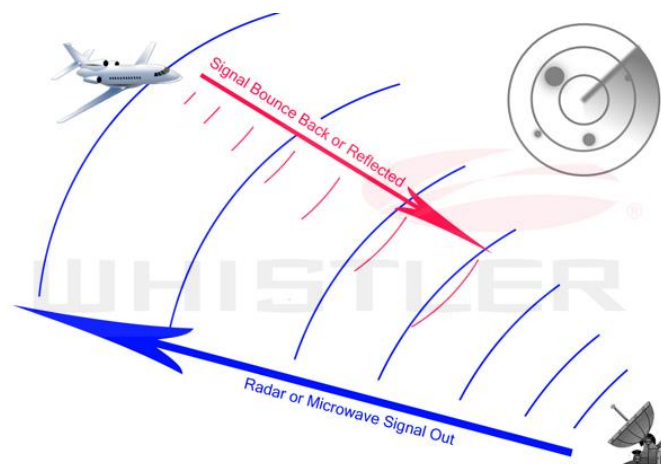


Figura 2.1.1: Funcionamiento gráfico radar [5]

Una de las grandes ventajas de las ondas electromagnéticas es que se desplazan a la velocidad de la luz lo que nos permite obtener información prácticamente instantánea)

Una vez el radar recibe la onda emitida, calcula la información que sea útil de esta como el tiempo tardado en recibir la onda de vuelta, el cambio de frecuencia que sufre esta señal o la potencia a la que la recibimos. Esta información es entonces procesada y se extrae de ella datos como, velocidad, posición, etc....

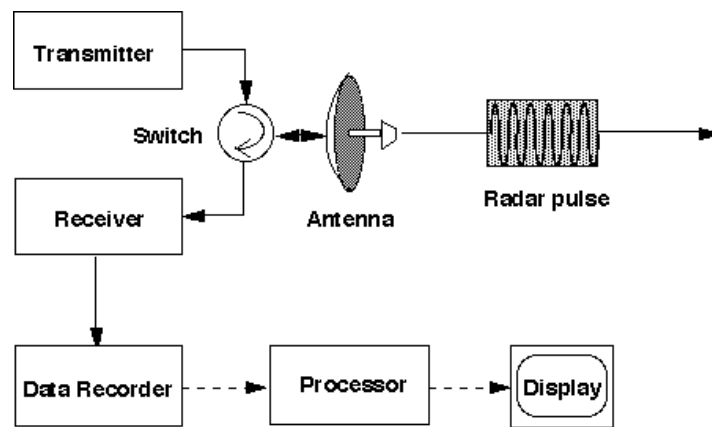


Figura 2.1.2: Explicación Grafica Sistema Radar Simple [6]

Un radar básico está compuesto por los siguientes componentes: transmisor, receptor, procesador y presentador. Todo empieza con la transmisión mediante la antena transmisora (en el caso de la ilustración la misma que la de recepción) emite la señal electromagnética con una determinada potencia. A continuación, el conmutador (*switch*), hace que la antena cese la transmisión y pase a modo recepción (podrían ser dos antenas independientes siendo por tanto innecesario el conmutador). Esta información pasa a un procesador, extrae la información y es presentada de la forma que corresponda.

Los radares se pueden clasificar de diferentes formas; según el número de antenas, según la frecuencia de trabajo, según su función (exploración aérea, exploración de superficie), según su objetivo (localización, detección, medida de velocidad, etc...) pero quizás la clasificación más importante sea según su modo de funcionamiento dividiéndolos en radares de onda continua y radares de onda pulsada

2.1.3 Radares de Onda Pulsada

Los radares de onda pulsada transmiten una señal de muy alta frecuencia con una gran potencia de forma pulsada. Después de este pulso le sigue un tiempo de silencio más largo con el fin de recibir la señal transmitida y escuchar el “eco” de la señal antes de volver a transmitir otro pulso. Con este tipo de radares se puede obtener dirección, distancia e incluso altitud del blanco según el posicionamiento de la antena y la forma de propagación de la señal. [7]

Estos radares se pueden clasificar fundamentalmente de dos formas:

Según su PRF (entendiendo PRF como la frecuencia de repetición del pulso):

- PRF alto (> 30 KHz)
- PRF medio (entre 3 y 30 KHz)
- PRF bajo (≤ 3 KHz)

PRF bajos nos aportan gran precisión, alcances no ambiguos grandes y buenos resultados en medición en distancia, pero sin embargo no son adecuados para la medición del Doppler (velocidad)

PRF altos tienen la ventaja que la potencia media de transmisión es superior y son muy aptos para la eliminación del *clutter*. Sin embargo tienen el inconveniente de que son extremadamente imprecisos en la medición de distancia.

Es por esto que se suelen utilizar PRF medios con el fin de solucionar las ambigüedades tanto en distancia como en velocidad

Según la preservación de la fase:

- Radares coherentes (preserva la fase)
- Radar incoherente (fase arbitraria pulso a pulso)

En este tipo de radares hay que tener en cuenta diferentes factores como la distancia no ambigua, las distancias ciegas y la máxima velocidad no ambigua. [8]

2.1.4 Radar de Onda Continua

A diferencia de los radares de onda pulsada, los radares de onda continua transmiten de forma ininterrumpida. Puede ser visto como un radar de onda pulsada con un ciclo de trabajo del 100%. Basan su funcionamiento en el efecto doppler (variación aparente de la frecuencia debido al movimiento de los blancos) y se pueden clasificar en diferentes grupos.

Estas son las principales formas de clasificar un radar [8]:

Según el número de antenas:

- Biestático: Una antena de transmisión y otra de recepción.
- Monoestático: La antena de transmisión y receptora es la misma.
- Quasi-monoestático: La antena transmisora y la receptora están tan juntas que desde el punto de vista del blanco parece que solo hay una antena.
- Multiestático: Combina la información recibida de varias antenas.

Según la forma de onda (en onda continua):

- Sin modular. Se basan en el desplazamiento frecuencial entre la señal recibida y la señal transmitida producido por el movimiento del blanco. Está basado en el efecto Doppler y no hay manera de calcular distancia, solo velocidad.
- Modulado: En este caso, el sistema transmite una señal que varía dentro de un rango determinado de frecuencias durante un periodo de tiempo determinado por una señal de modulación, siendo las más habituales: sinusoidal, diente de sierra o triangular.

Según identificación del objetivo:

- Radar primario: Es el funcionamiento básico en el cual se detecta un blanco recibiendo su eco correspondiente.
- Radar secundario: Realmente es una técnica que se utiliza en la que la señal proveniente del blanco corresponde a una señal producida por una baliza, un repetidor o un transpondedor. Gracias a esto, además del eco radar, se obtiene cierta información de utilidad como es la identificación de aeronaves.

Según su finalidad, algunos ejemplos pueden ser:

- Radar de seguimiento: Son aquellos en los que su principal función es el seguimiento automático del objetivo.

- Radar de búsqueda: Es utilizado principalmente para la detección de blancos dentro de una determinada zona de interés. Se utilizan para corto, medio y largo alcance.

También se pueden clasificar dependiendo de la banda de frecuencia en la que trabajen. En la imagen a continuación se puede ver la división de funciones según frecuencia.

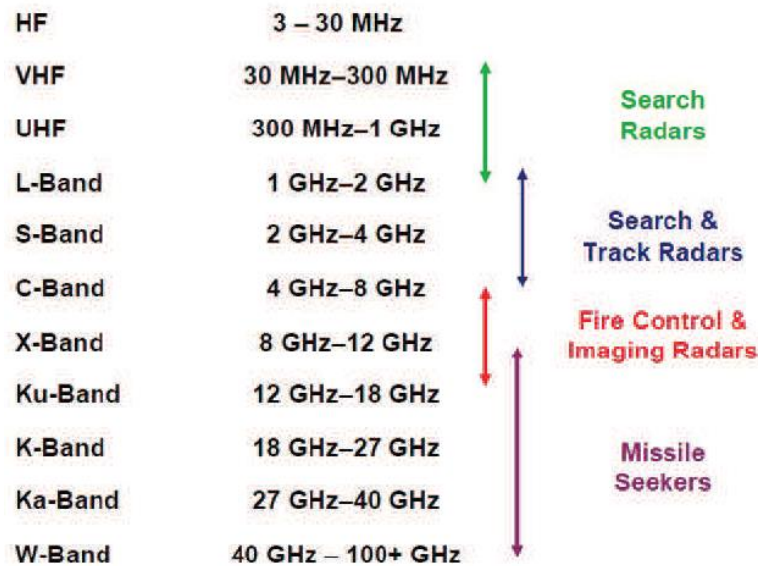


Figura 2.1.3: Usos de bandas de frecuencia [8]

El principal problema que surge del funcionamiento básico de los radares de onda continua es que, son únicamente capaces de detectar velocidades gracias al efecto Doppler. El efecto Doppler consiste básicamente en la variación de frecuencia aparente de la señal transmitida (del orden de Hz hasta KHz en blancos de gran velocidad) según el blanco se aleje o se acerque.

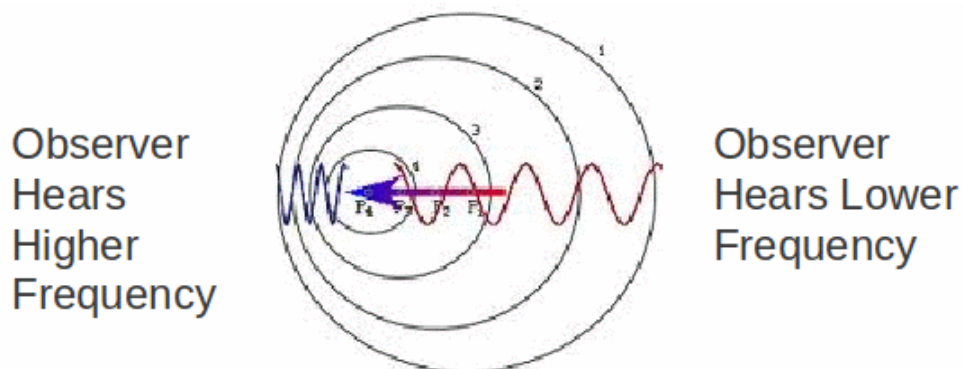


Figura 2.1.4: Explicación Gráfica del efecto Doppler [9]

Para solucionar esta limitación surgen los radares de frecuencia modulada. El proceso de modular consiste en marcar en el tiempo la señal mediante la variación repetida de la frecuencia, teniendo así un parámetro con el que calcular el tiempo tardado en recibir la señal de vuelta. Tenemos entonces dos parámetros con los que poder calcular tanto la velocidad como la distancia. Estos dos parámetros se

calculan gracias a la frecuencia de batido. A continuación se explica con más detalle la forma de obtener distancia y velocidad:

2.2 Cálculos para obtención de distancia y velocidad en radar de onda continúa.

Como he explicado anteriormente, de una señal podemos obtener tanto velocidad como distancia al mismo tiempo, pese a tener dos incógnitas. Este cálculo se puede realizar para los diferentes tipos de onda. Viendo las diferentes señales, pero las más utilizadas son los tipos de modulación de onda continua: dientes de sierra y triangular.

La forma de onda, ya sea del tipo diente de sierra o triangular, no modifica el funcionamiento del sistema en sí. El mayor de los cambios que provoca es que la expresión del cálculo de la frecuencia de batido será diferente en cada caso.

Señal diente de sierra: La forma de esta señal hace que en cada periodo el VCO genere un barrido completo de frecuencia.

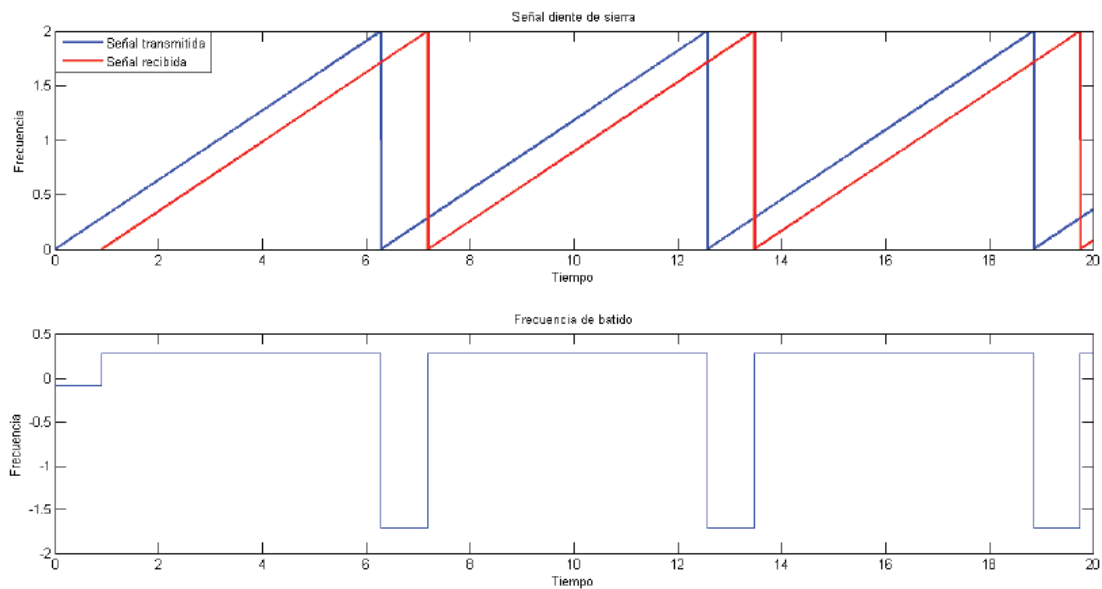


Figura 2.2.1: Representación gráfica señal en Dientes de Sierra y frecuencia de batido [10]

Señal triangular: La señal triangular provoca que, en un solo periodo, el VCO genere dos barridos: uno durante la parte de pendiente positiva de la señal triangular y el otro en la parte de la pendiente negativa.

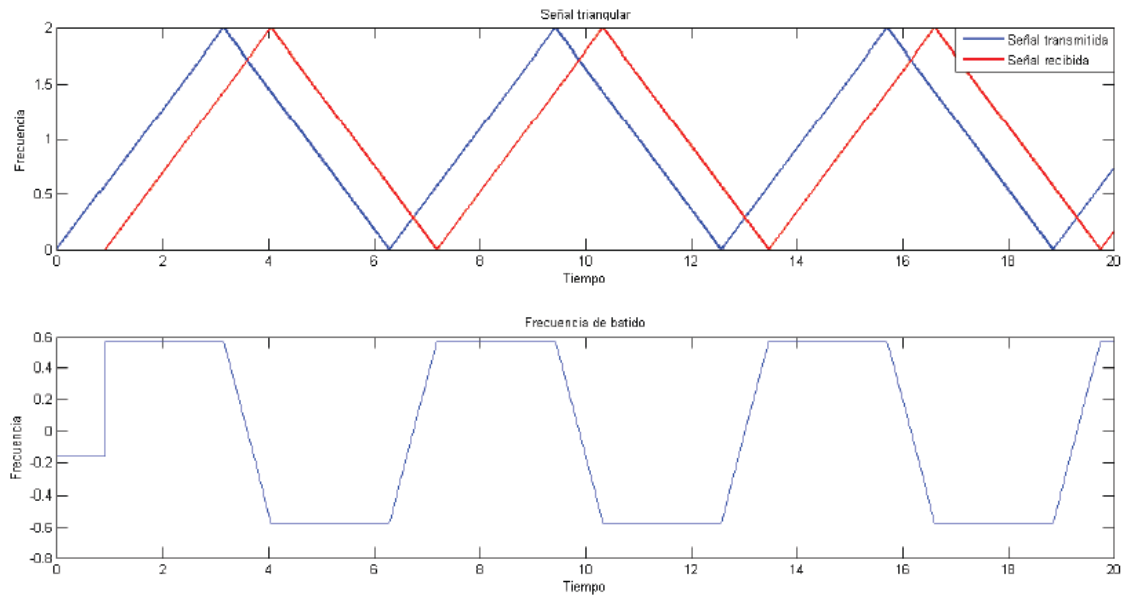


Figura 2.2.2: Señal triangular y frecuencia de batido [10]

Si el blanco fuera móvil y hubiera que tener en cuenta el efecto Doppler, resulta más recomendable utilizar la señal triangular, por tanto se utilizará este tipo de señal.

Hay que tener en cuenta también otros parámetros como la frecuencia de modulación y la amplitud de la señal que vendrán delimitadas por la tarjeta de sonido.

Finalmente se opta a utilizar la señal triangular por su correcta medición en distancia y su rendimiento óptimo en velocidad. Para definir correctamente los parámetros de la señal a transmitir, será necesario comprender el funcionamiento en el cual se basa este tipo de modulación.

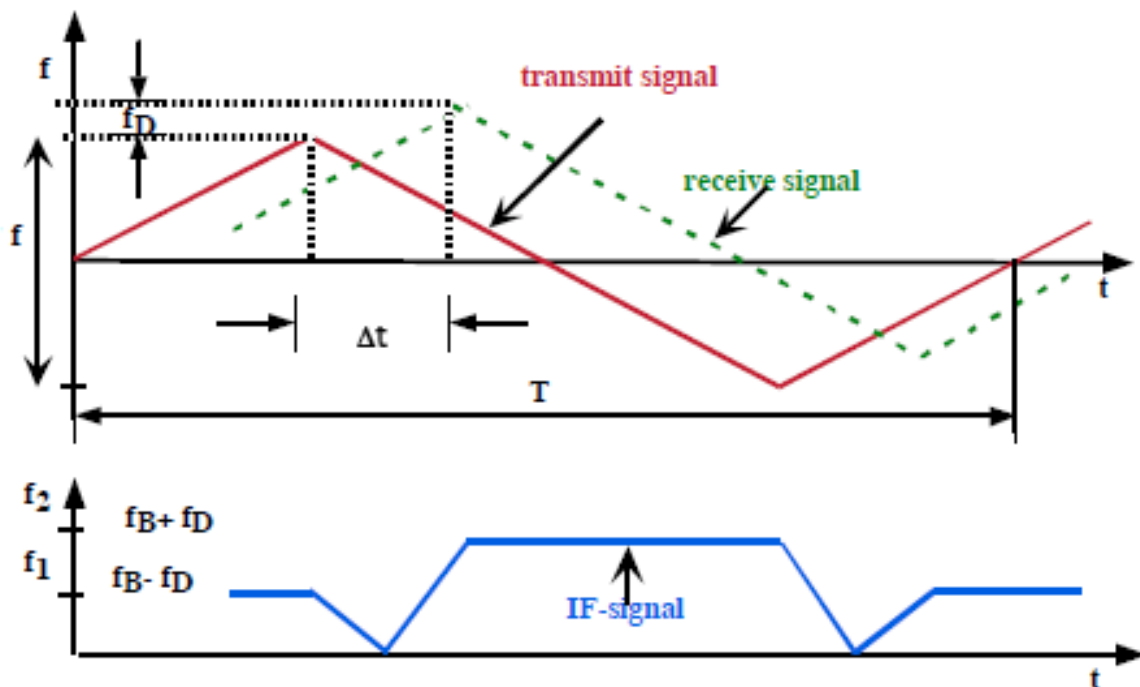


Figura 2.2.3: Representación gráfica frecuencia de batido [10]

En la ilustración podemos ver la señal transmitida (en color tojo) y la señal recibida (en verde discontinua). De ese gráfico se pueden destacar dos aspectos fundamentales; la señal recibida no está solo desplazada en el eje temporal (hacia la derecha) sino que también lo está en el eje vertical (hacia arriba). Esto se debe a que la onda llega con un retardo que será lo que nos permitirá calcular la distancia al blanco, y con una variación aparente de frecuencia debido al efecto Doppler. Para obtener estos dos parámetros, será necesario calcular la frecuencia de batido en un primer lugar. Simplificándolo gráficamente, la frecuencia de batido se puede considerar la diferencia entre las dos ondas verticalmente (en el eje de frecuencia) tanto a la subida como a la bajada. Hay que darse cuenta que no serán valores iguales pero si están relacionados, es decir, en el flanco de subida podemos observar que la diferencia entre las dos señales es mínima mientras que es mucho más grande en el flanco de bajada (eso es f_{b+} y f_{b-}). Si el blanco no estuviese en movimiento, no habría variación de frecuencia, lo que significaría (gráficamente) que tenemos una señal retardada en tiempo pero no en frecuencia.

El primer parámetro a considerar en el diseño de una señal es la resolución en distancia que se desea obtener, siendo esta la distancia transversal a la dirección de transmisión del radar que es capaz de diferenciar. Dicha resolución viene dada por:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad \text{Donde:} \quad \begin{cases} c = \text{velocidad de propagación (m/s)} \\ B = \text{ancho de banda (Hz)} \\ \Delta R = \text{Resolución en distancia (m)} \end{cases}$$

Ecuación 2.2.1

Para poder entender posteriormente distancia y velocidad, es necesario previamente obtener la frecuencia de batido (f_B). La frecuencia de batido es el resultado que sale del mezclador y varía directamente con la distancia al blanco, incrementándose esta a medida que la distancia aumenta. Para calcularla, utilizamos la ecuación de a continuación:

$$f_B = \frac{2 f_m B R}{c} \quad ; \text{donde} \quad \begin{cases} f_B = \text{Frecuencia de Batido (Hz)} \\ f_m = \text{Frecuencia de modulación (Hz)} \\ B = \text{Ancho de banda (Hz)} \\ R = \text{Distancia del objeto (m)} \\ c = \text{Velocidad de propagación (m/s)} \end{cases}$$

Ecuación 2.2.2

Matemáticamente, para el cálculo de distancia y velocidad con este tipo de radar, se utilizan las ecuaciones que a continuación se muestran:

$$R = \frac{cT}{2B} \left(\frac{f1 + f2}{2} \right) \quad ; \text{donde} \quad \begin{cases} f1 \text{ y } f2 = \text{Resultado de } f_B - f_D \text{ y } f_B + f_D \text{ (Hz)} \\ T = \text{Periodo de la señal (s)} \\ B = \text{Ancho de banda (Hz)} \\ R = \text{Distancia del objeto (m)} \\ c = \text{Velocidad de propagación (m/s)} \end{cases}$$

Ecuación 2.2.3

$$V = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{f1 - f2}{2} \right) ; \text{ donde } \begin{cases} f1 \text{ y } f2 = \text{Resultado de } f_B - f_D \text{ y } f_B + f_D \text{ (Hz)} \\ \lambda = \text{Longitud de onda (m)} \\ V = \text{Velocidad del objeto (m/s)} \\ c = \text{Velocidad de propagación (m/s)} \end{cases}$$

Ecuación 2.2.4

Este es básicamente el funcionamiento de cualquier radar de onda continua (especificando la explicación para onda triangular). Solo hace falta definir un último parámetro necesario para poder realizar estos cálculos: una referencia temporal. Para poder comparar la diferencia de tiempo entre señal transmitida y recibida, hace falta establecer un origen como puede ser un generador de onda cuadrada teniendo un flanco para subida y otro flanco para bajada.

2.3 Radares de bajo coste comerciales

Como se pudo ver en la introducción de la historia del radar, el radar es un instrumento relativamente moderno e indudablemente complejo. En sus orígenes era inimaginable pensar que se podría construir un radar con unas prestaciones aceptables por el precio que hoy en día se puede hacer.

En los últimos años ha habido muchos experimentos tanto por radioaficionados que han construido radares de este estilo como empresas tecnológicas que se suman a los intentos de realizar un radar de reducidas dimensiones y de bajo coste.

Entre todos los radares diseñados por empresas destacan los siguientes:

-Siver sima: Se trata de una empresa especializada en productos que basen su funcionamiento en osciladores. Ofrecen una gran variedad de sensores radares a diferentes frecuencias, costes y diferentes equipos según objetivos. Merece especial mención de esta empresa el radar RS3400K00. Este radar funciona en la frecuencia de 24 GHz.



Figura 2.3.1: Transceiver RS3400K00 de SIVER SIMA [11]

Este sensor tiene un tamaño aproximado de 6.5x3.8 cm, es alimentado con 4 V transmitiendo con una potencia de 15 dB a una frecuencia de 24 GHz con un ancho de banda de 1500 MHz. Su coste es de entorno a los 580 Euros.

-Sonicelectronic: Fabrica una amplia gama de radares con especificaciones muy diferentes más enfocadas a nivel usuario dejando pocas aplicaciones libres. El más básico es el radar SSR-80 enfocado a utilizarlo en los coches como aviso de proximidad. Trabaja en diferentes frecuencias (bandas X, H y Ka).

-RFbeam: Esta marca posee también una amplia gama de radares de tamaño reducido y bajo coste destacando entre ellos el K-LC2, radar de bajo coste para pequeñas distancias que trabaja en la banda K (24 GHz) con aplicaciones tan dispares como sensores de seguridad, automoción y medicina.

Además de estos ejemplos, hay muchas empresas que se dedican a la construcción de radares como Whistler, Beltronics y muchos más, existiendo una gran gama de radares por debajo de los 200 dólares.

Además se están llevando a cabo grandes esfuerzos por reducir el coste y dimensionamiento de los actuales equipos radares. Como ejemplo principal tenemos los radares llamados “*radar on a chip*” que como su nombre indica, son radares de dimensiones tan reducidas que son integrados en chips, destacando especialmente el comercializado por la marca VIASAT. Al igual que los anteriores se trata de un radar que funciona en la banda de 24GHz transmitiendo con una intensidad de 6dB. Su principal característica es su tamaño (el cual se muestra en la figura 2.3.2).

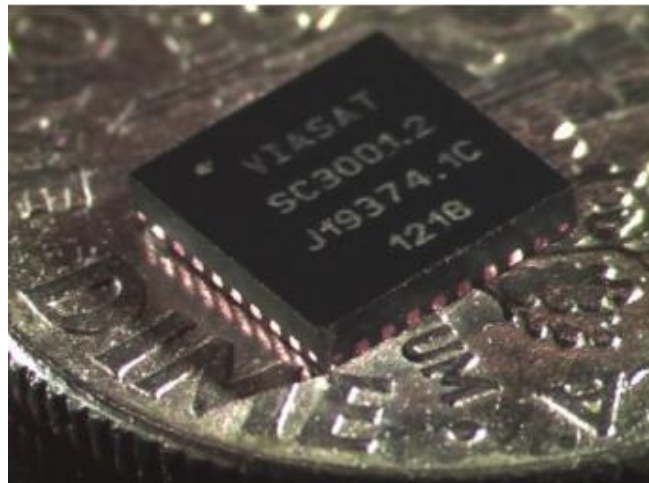


Figura 2.3.2: Single Chip 24GHz Radar Transceiver de Viasat [12]

2.4 Radares bajo coste no comerciales

2.4.1 Varios Radares

De los radares existentes, existen diferentes modelos que trabajan con diferentes parámetros. Merecen especial mención:

-Sensores de movimiento: No se trata de un radar como tal, sino la conversión de un detector de movimiento (que funciona gracias a la variación de frecuencia Doppler) en un radar de corto alcance. El más destacado es el llevado a cabo con el HB100 (*Microwave Sensor Module*). Es un experimento en el que el principal objetivo es acoplarle un amplificador para aumentar la señal producida por el Doppler. Una vez conseguido esto, las implementaciones posteriores son ilimitadas (medición de velocidades de los blancos, instalación de pantalla LCD...

-Radar Infrarrojo [13]: Este radar es especialmente particular por su modo de funcionamiento, señal infra-roja. Utiliza un microcontrolador PIC 18F458 y el sensor GP2D12. Este es un sensor medidor de distancias mediante infra-rojos. El modo de funcionamiento es muy simple; a la salida del

sensor, envía una amplitud dependiente de la distancia al objeto. El principal defecto de este radar es su corto alcance, ya que este tipo de sensores rara vez sobrepasan el metro y medio de distancia, siendo muy preciso pero limitándose mucho las posibles aplicaciones. Por tanto, este tipo de radares es muy interesante para muchos casos, pero no para la construcción de un radar capaz de medir velocidad y distancia.

- **Sensor giratorio con pantalla LCD** [14]: No se puede considerar un radar como tal ya que trabaja con ultrasonidos, es decir, se trata de un sonar que permite tomar mediciones de corto alcance en distancia. Como la gran mayoría de los sensores de distancia diseñados con Arduino, se basa en la utilización de un sensor ultrasónico, un servo-motor y representación de la imagen en la pantalla. Este radar tiene muchas ventajas, como son su presentación, su independencia de un ordenador, su fácil representación y su escaso peso (entre otros). Además, con los materiales ya adquiridos, lo único necesario es ensamblarlo, ya que las librerías son accesibles a todo el público. Sin embargo, no son todo ventajas y tiene, al igual que el anterior, una gran desventaja: el alcance. Con un sensor ultrasónico, la distancia que podemos alcanzar sigue siendo muy pequeña (incluso amplificando la señal) alcanzando lo que es el sensor en sí unos 3 metros.

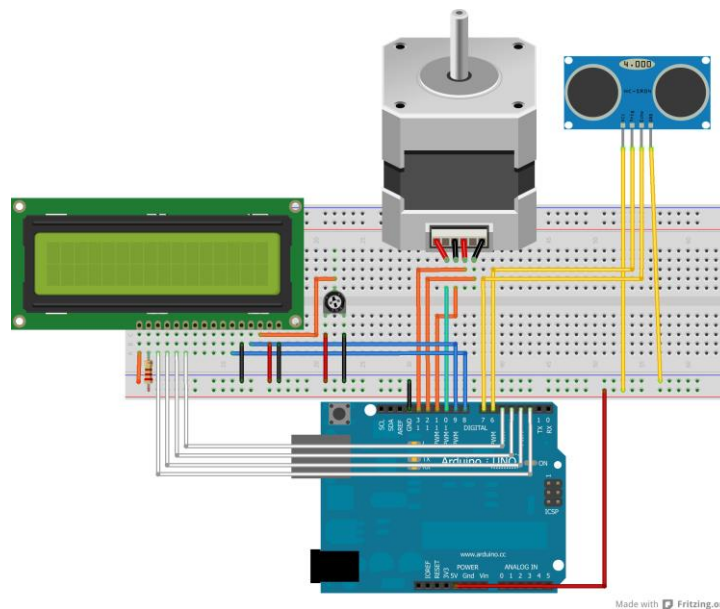


Figura 2.4.1: Sensor de distancia giratorio con pantalla LCD [14]

2.4.2 Coffee can Radar

Una especial mención merece el trabajo realizado por Gregory L. Charvat consistente en la construcción de un radar. Para realizarlo, se basó únicamente en componentes ya existentes (no tuvo que diseñar ninguna parte nueva) y lo realizó con un presupuesto muy reducido. Los resultados, muy satisfactorios, han captado el interés de otros radioaficionados que repiten un diseño similar al suyo con algunas modificaciones.

El Dr. Gregory L. Charvat, natural de Detroit, se graduó en 2007 en la universidad de Michigan, haciendo un MSEE (Máster en ingeniería eléctrica) en la misma universidad. Más tarde se hizo profesor de la misma universidad, en la que participa activamente en un laboratorio de investigación y donde continúa dando cursos. [3]

Ganó una gran relevancia a nivel mundial con su curso “*Build a small radar system course*” [15] en el que ponía como ejemplo su radar y explica (como el nombre del título) como fabricar tu propio radar. Desde entonces ha impartido numerosos seminarios, trabajado en diferentes investigaciones y

artículos y es autor de diversas patentes. Es también el autor del libro “*Small and Short Range Radar Systems*” [16] en el que habla de trabajos llevados a cabo por él.

El radar recibe este curioso nombre debido a las antenas que utiliza son dos latas de café metálicas, lo que le dio gran publicidad ya que la idea principal del Dr. Charvat es la construcción de un radar de bajo coste.

El “*coffee can radar*” tiene un diseño muy simple con unos resultados muy buenos. Está compuesto por un circuito de radiofrecuencia, baterías (pilas), un filtro-amplificador y un generador de rampa además de las dos famosas antenas. Una vez obtuvo unos resultados aceptables, empezó a desarrollarlo mejorándolo en dimensionamiento y características, llegando hacer imágenes SAR utilizando el radar y railes con las que generó una patente.

Este radar fue uno de los primeros de este tipo y por ello tiene una mayor relevancia. El curso impartido posteriormente por él mismo trató de mostrar cómo hacer un radar similar al suyo, siendo seguido a nivel internacional y provocando un gran número de experimentos y trabajos relacionados a este radar por parte de aquellos interesados en este campo.

A partir del radar de Gregory L. Charvat, han aparecido muchos radares similares al diseñado por este. Si bien no todos tienen exactamente las mismas características, coinciden en los parámetros más significativos como son el filtro, el generador de pulsos y las antenas (latas metálicas). El parámetro que más varía entre los radares de este estilo, es la distancia entre antenas, llegando a ser mayor a un metro en algunos casos.

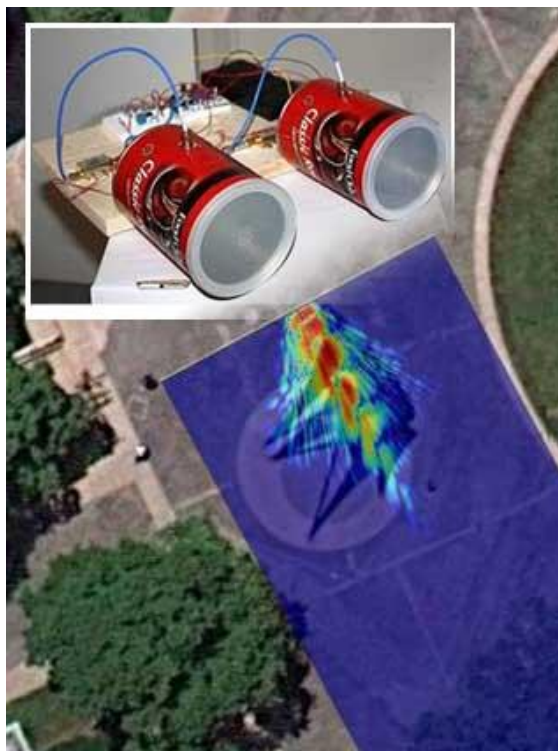


Figura 2.4.2: Coffee Can Radar de Gregory Charvat [3]

Del abanico de posibilidades existente se hace un estudio para descartar las peores opciones y quedarse con la más beneficiosa:

-Por un lado, utilizar un sensor infrarrojo sería bastante simple y preciso, pero es cierto que no tendría el alcance adecuado para el proyecto que se pretende realizar, además de la dificultad de medir velocidades.

-Por otro lado, utilizar un sensor ultrasonidos. Es otro buen ejemplo de precisión y con este si podría medir velocidades. El problema que se sigue teniendo, es que no la distancia máxima que alcanza este sensor es muy pequeña (3 metros) por lo que descarto este modelo y además no se puede considerar un radar como tal.

-Finalmente tenemos el modelo del profesor Gregory L. Chavart. Es menos económico que las otras propuestas, hacen falta más equipos y materiales y mayores conocimientos de programación. Sin embargo, los resultados alcanzados son muy buenos y permite obtener velocidad y distancia si se modula la señal.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Investigación y recopilación de información

El primer paso en el diseño de este radar fue el de recopilar información. Utilizando libros destacados en la bibliografía pero sobre todo basado en las posibilidades que ofrece internet.

Se comenzó por investigar los antecedentes similares a este proyecto, destacando los antes descritos en el apartado de estado del arte. Una vez vistas las posibilidades, se decidió realizar un diseño similar al de los estudiantes de la MIT por las enormes ventajas que supone un radar de este estilo. Partiendo de esta idea inicial, se investigó cómo adquirir todas las partes del radar. Para ello, los principales puntos de investigación en los que se han trabajado:

- Profundizar en el conocimiento del funcionamiento de un radar de onda continua.
- Comprobar la disponibilidad de los equipos necesarios.
- Limitaciones de cada una de las piezas y hacer una lista de las posibilidades.
- De las diferentes posibilidades, selección de la mejor viable.

No todas las decisiones han sido las adecuadas la primera vez, sin embargo, una vez localizado por qué no eran, ha sido posible reemplazar los componentes por otras posibilidades. Esto sirve para encontrar las limitaciones del sistema y buscar mejoras.

Una vez terminada la fase de investigación y diseño, comienza la etapa de construcción, solucionando los problemas cuando fue posible y buscando soluciones alternativas cuando ese componente no era el adecuado. Han necesitado una posterior fase de investigación adicional los componentes de filtrado y amplificación y el de generador de rampa.

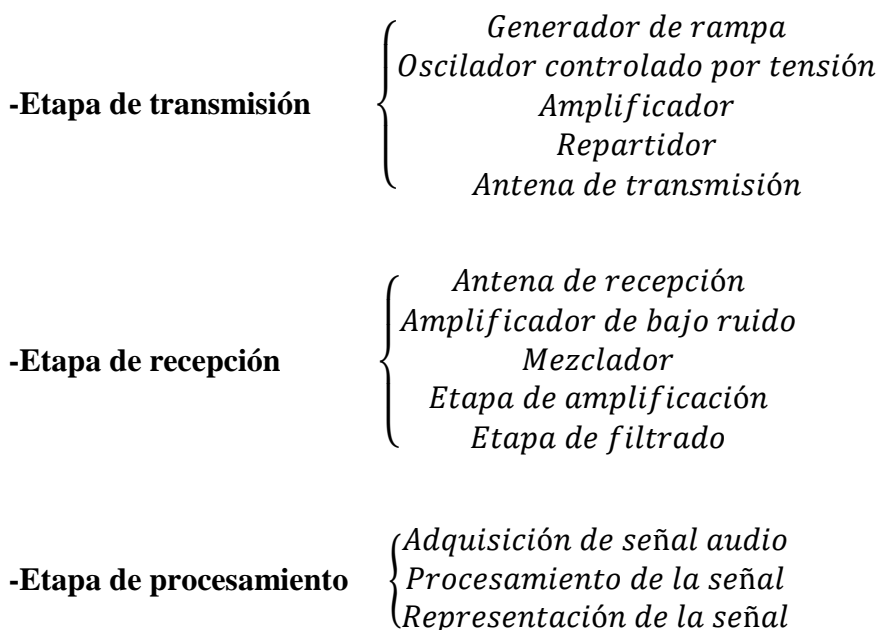
Destacar que esta “parte” del proyecto no tiene una delimitación temporal, ya que, si bien tiene una mayor carga al inicio, ninguna etapa del proyecto está exenta de investigar cómo funcionan los componentes para obtener el rendimiento esperado de ellos.

3.2 Diseño y Construcción del radar

3.2.1 Funcionamiento del radar

El fundamento en el cual se basa el radar es el de la reflexión de las ondas. Para ello por tanto, será necesario emitir una señal que luego seamos capaces de recibir y, con su correspondiente tratamiento, obtener información de ella.

Para ello, podemos dividir el radar en 3 etapas bien diferenciadas:



En concreto, este radar funciona de la siguiente manera:

El Arduino genera una rampa de tensión entre 0 y 5 voltios que introduce en el oscilador controlado por tensión. Este oscilador convierte esta señal de tensión en una señal triangular en frecuencia determinando el ancho de banda del radar que será la diferencia entre la frecuencia máxima y la mínima el ancho de banda. Esta es la señal se envía al mezclador pasando previamente por el atenuador¹ y amplificador. Una vez llega al mezclador, parte de la señal es dirigida al divisor y la otra parte es transmitida por la antena.

La señal es entonces transmitida, reflejada en el objeto y recibida por la antena de recepción (idéntica a la de transmisión) donde es amplificada y posteriormente introducida en el mezclador, que comparará la señal transmitida con la recibida. La señal resultante se amplifica y se pasa por un filtro de paso bajo con objeto de eliminar el resto de frecuencias las cuales carecen de interés y evitar el “aliasing²”. Finalmente esta señal se introduce en el ordenador.

¹ El atenuador es únicamente necesario para cumplir con los límites que establece la legislación europea en términos de potencia máxima de transmisión. En este caso, al ser un sistema experimental con un alcance muy limitado se puede obviar.

² Aliasing: Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de muestreo es inferior al doble de la frecuencia máxima que contiene una señal y por lo tanto insuficiente para hacer el muestreo correctamente, con lo cual aparecen frecuencias “fantasmas” no presentes en la señal original.

Para el muestreo, se utilizará un programa que nos permita grabar la señal y almacenarla como un archivo audio. Una vez hecho esto y con la señal ya almacenada, procesamos esa señal con Matlab y mediante el uso de las ecuaciones antes relacionadas (A 2.2) obtenemos y representamos en gráficas la información obtenida.

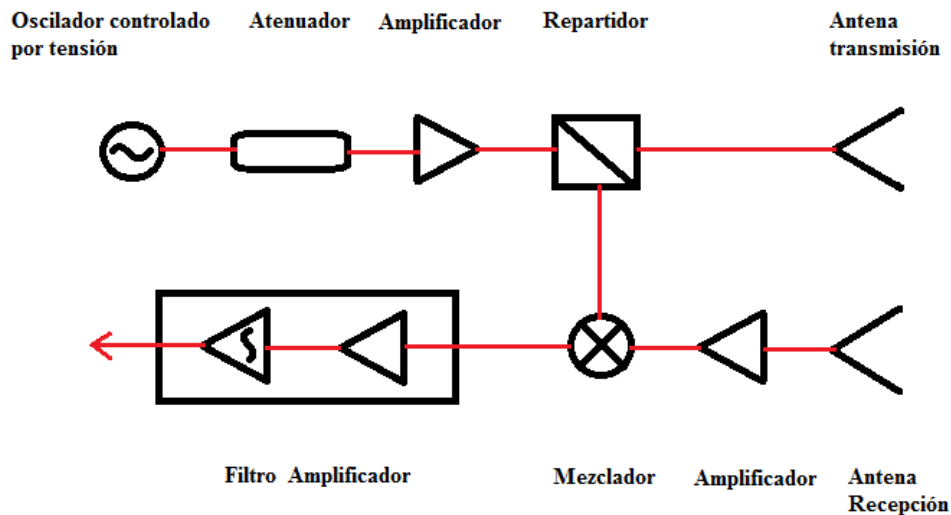


Figura 3.2.1: Esquema gráfico del radar

3.3 Etapa de transmisión (Generador de rampa, circuito radiofrecuencia y antena)

3.3.1 Generador de rampa y pulsos

Lo que se pretende en esta fase es la generación de una rampa en tensión para que el Oscilador la convierta en una rampa en frecuencia. Esto significa, que si se pretende hacer una señal triangular y la relación entre voltaje y frecuencia es directa, habrá que ir aumentando sucesivamente la tensión y disminuirla igualmente para tener la misma relación en frecuencia.

El generador de rampa se puede considerar la primera fase del circuito de radiofrecuencia. Para generar la forma de onda en frecuencia que ataca al VCO (en nuestro caso un triángulo o diente de sierra), debe generarse una señal. En el diseño original del DR. Charvat, se emplea un oscilador basado en un circuito integrado para generar dicha rampa. Esta idea resta flexibilidad a la solución final, pues no pueden variarse gran parte de los parámetros de la forma de onda. Una alternativa sería utilizar un elemento que sintetizase cualquier forma de onda que deseásemos. Esta es la solución adoptada en este TFG, empleando un procesador y un convertor digital a analógico (DAC) conectado en él.

Entre los procesadores existentes, destaca la marca Arduino, que dispone de una gran gama de procesadores y elementos relacionados con estos, siendo el más básico de esta marca el “Arduino UNO”.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa y diseñada con el fin de facilitar tareas de electrónica en prácticamente todos los campos existentes.

El Arduino UNO en concreto, se caracteriza por su simplicidad, compatibilidad y precio. En cuanto al software, utiliza un entorno programable en lenguaje processing/wiring. Arduino puede recibir señales del entorno gracias a las entradas (analógicas y digitales) y con la programación decidir qué hacer con la información procesada, pudiendo controlar otros mecanismos mediante sus salidas.

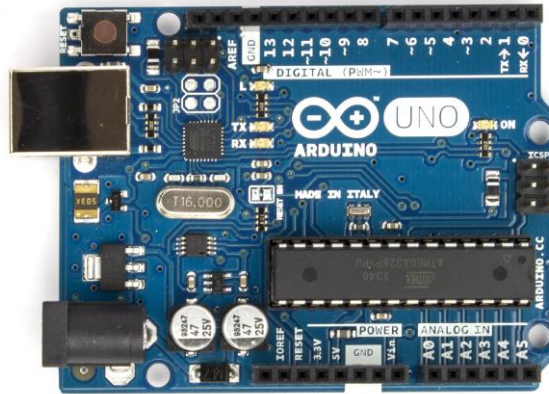


Figura 3.3.1: Arduino UNO [15]

La versatilidad del Arduino me permite generar una señal a voluntad. Lo único que hay que hacer es cargar un programa diferente para generar señales diferentes. Esto no solo me permite variar el tipo de señal sino los parámetros de ella (frecuencia, amplitud...). Por lo tanto ya tenemos un sistema flexible para generar la señal que queramos.

Se utilizarán las ecuaciones del apartado 2.2 para diseñar adecuadamente la señal a transmitir. Hay una gran cantidad de factores a tener en cuenta y guarda especial relación la generación de rampa con la resolución en distancia. Por lo visto anteriormente (ecuación 2.2.1), la resolución en distancia es directamente proporcional al ancho de banda (a mayor ancho de banda, mejor resolución en distancia) por lo que nos interesa que esta sea lo mayor posible. En nuestro caso la limitación vendrá dada por el VCO cuyo rango de funcionamiento viene dado entre 0 y 5 voltios.

Con los primeros contactos con el Arduino surge el primer problema: El Arduino no dispone de salida analógica (solo entrada) por lo que, a priori, no se puede generar una señal. Entonces se sopesaron diversas soluciones:

-Utilizar otro tipo de Arduino (como el Arduino DUE) que si dispone de salida analógica. El problema es que la amplitud de salida máxima que ofrece el Arduino DUE es de 3.3V por lo que habría que acondicionar la señal para obtener la máxima excursión en tensión del VCO, o bien limitar el ancho de banda de la señal de radiofrecuencia lo que afectaría la resolución en distancia.

-Utilizar una salida PWM de Arduino (Modulación por ancho de pulsos) que permitiría obtener una aproximación de la señal. El problema es que generaría una señal muy ruidosa.

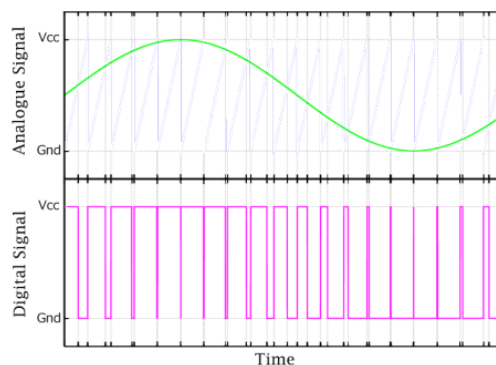


Figura 3.3.2: Gráfico explicación PWM

-Utilizar un DAC (Digital to Analog Converter). Consiste simplemente en convertir la señal de digital en analógica. Es un componente barato y con una resolución suficiente (12bits) por lo que consideré que era la mejor solución a utilizar. Además, el empleado en este TFG tiene un rango de salida de 0 a +5V por lo que no supone ningún impedimento.

El DAC utilizado es el MCP4725 de MICROCHIP [18]. Una vez se ha conectado al Arduino es necesario programar el código para establecer el número de puntos que queremos utilizar y la velocidad del bus.



Figura 3.3.3: DAC MCP4725 [18]

Al programar el Arduino para obtener la señal deseada surgió un nuevo problema: El DAC se comunica con el Arduino a través del bus I²C (Inter-Integrated Circuit). El Arduino Uno trabaja con una velocidad de reloj relativamente lenta por lo que la comunicación con el DAC se ve afectada enormemente. Puesto que el Arduino tiene que enviar al DAC en tiempo real todos y cada uno de los puntos que conforman la onda utilizando el bus I²C, su generación se hace lenta, haciendo que aumente el tiempo invertido en generar un periodo completo. Esta limitación es independiente del DAC empleado (el utilizado en este trabajo permite generar señales con una frecuencia de reloj de hasta 3'4 MHz) y depende únicamente de su comunicación con el Arduino que es muy lenta

Después de investigar el origen de este problema, se consigue una solución parcial que consiste en cambiar el registro TWBR (*Two Wire Bit Rate Register*) del Arduino que modifica la velocidad del bus y hace que las transferencias al DAC se realicen algo más rápido, no obstante, sigue existiendo una restricción en la velocidad de transferencia de las muestras del DAC. Además, se descubre que conforme se aumenta el TWBR, también aumenta el *Jitter* (la variación temporal del retardo) por lo que la señal obtenida será menos estable. Finalmente se llega a un compromiso entre velocidad y *Jitter* y se establece la velocidad de transferencia de muestras en 400 muestras por segundo.

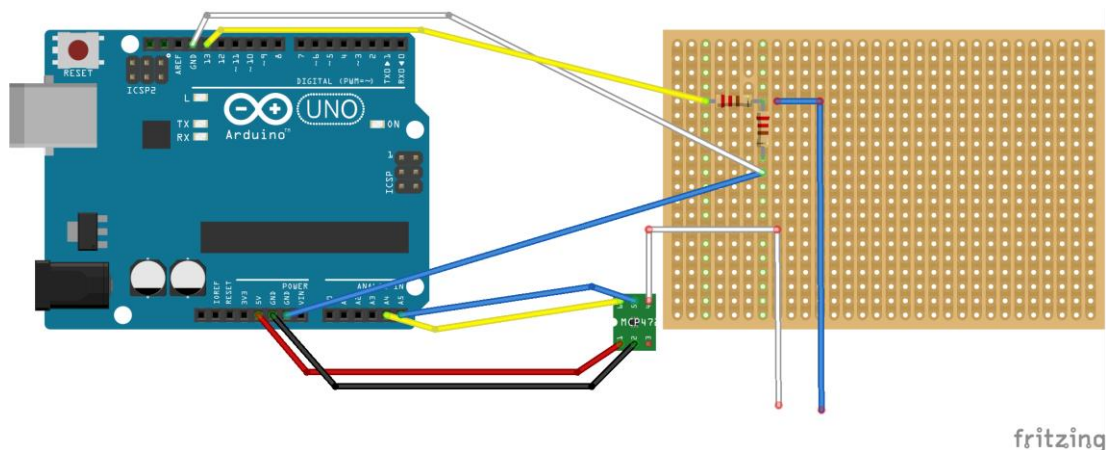


Figura 3.3.4: Conexiones Arduino-DAC-Divisor de Tensión

Tal y como se ha comentado en el apartado 2, para poder determinar la distancia al blanco transmitiendo una señal triangular en frecuencia, es necesario tener una referencia temporal (un origen en el tiempo) para saber en qué momento enviamos la señal y compararla con el tiempo que tardamos en recibirla. Esto se puede hacer de una forma tan simple como la generación de una señal rectangular (flanco de subida para una rampa ascendente y flanco de bajada cuando la pendiente sea máxima e igualmente para bajada), teniendo así en qué momento enviamos la señal. Esta señal puede obtenerse a partir de una de las salidas digitales de Arduino, que permite obtener una tensión de 0 V (estado lógico bajo) o +5V (estado lógico alto). No obstante, esta señal es excesivamente grande, y además de saturar la entrada de la capturadora de sonido, interfiere la señal de recepción, por lo que se decidió reducir la amplitud de esta señal mediante un divisor de tensión que permite obtener una señal de 0 y 500 mV (niveles bajo y alto respectivamente), siendo suficiente para tomar referencias.

Para generar la señal de disparo, basta con establecer en el código la generación de un pulso por cada inicio de rampa acabando este con el final de la rampa. Esto se puede hacer aprovechando las salidas digitales del Arduino transmitiendo 5 y 0 voltios. De esta forma se consigue que la generación de la rampa quede sincronizada con el pulso de disparo.

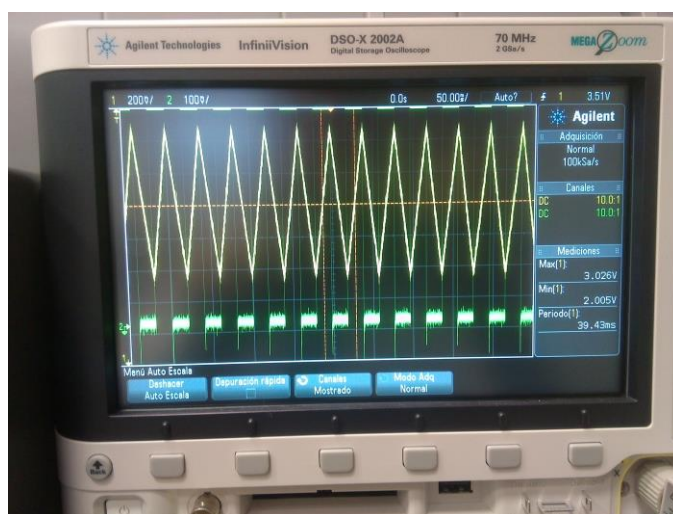


Figura 3.3.5: Señal triangular y rectangular obtenidas

3.3.2 Circuito de radiofrecuencia (transmisión)

Una vez tenemos la rampa en tensión la función del circuito de radiofrecuencia es necesario introducirla en la entrada del VCO para generar la señal que deseamos con la adecuada potencia a la antena para que esta la transmita al medio. Para ello será necesario el uso de un oscilador y un amplificador además del repartidor que será necesario para las siguientes etapas.

La generación de la señal de radiofrecuencia se realiza empleando un VCO (Oscilador controlado por tensión). La frecuencia de la señal de salida de un VCO ideal es linealmente proporcional a la tensión en su entrada.

En este TFG se ha seleccionado como VCO el modelo ZX95-2536C-S+ [19] fabricado por Mini circuits. A continuación se muestra la curva característica frecuencia-tensión de este VCO (Figura 3.2.4).

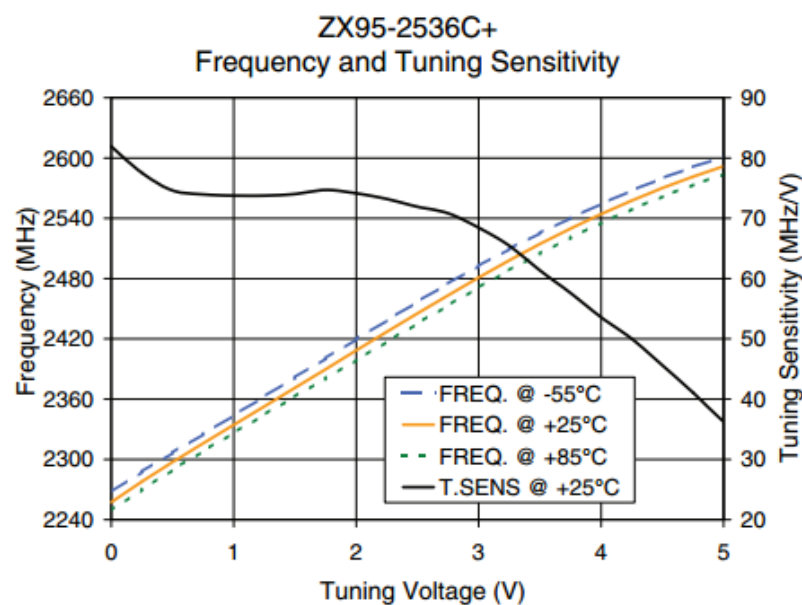


Figura 3.3.6: V vs Freq VCO ZX95-2536C-S+ [19]

Como se puede apreciar (color naranja), la relación entre tensión y frecuencia es aproximadamente lineal, variando ligeramente a los 3,5 V. Para simplificar los cálculos, y dado que una excursión en frecuencia mayor nos aporta una mayor resolución en distancia, utilizaré una tensión de entre 0V y 5V, obteniendo a la salida del VCO un ancho de banda de entre 2,2427 GHz a 2,5761 GHz (333,4 MHz, comprobado experimentalmente con el analizador de espectros).

Si bien es cierto que no es necesario un ancho de banda superior al obtenido para obtener resultados adecuados, aquí encontramos nuestra primera limitación, la resolución en distancia. Tanto el Arduino como el Oscilador tienen un rango de funcionamiento de entre 0 y 5 Voltios por lo que el ancho de banda será de 333.4 MHz lo que implica una resolución en distancia de 0.45 metros (ecuación 2.2.1)

Para poder comprobar que el ancho de banda es el calculado, utilizaremos el analizador de espectro, con el cual además de poder calcular el ancho de banda máximo (los 333,4 MHz) podemos comprobar cómo va generando la rampa en frecuencia correctamente.

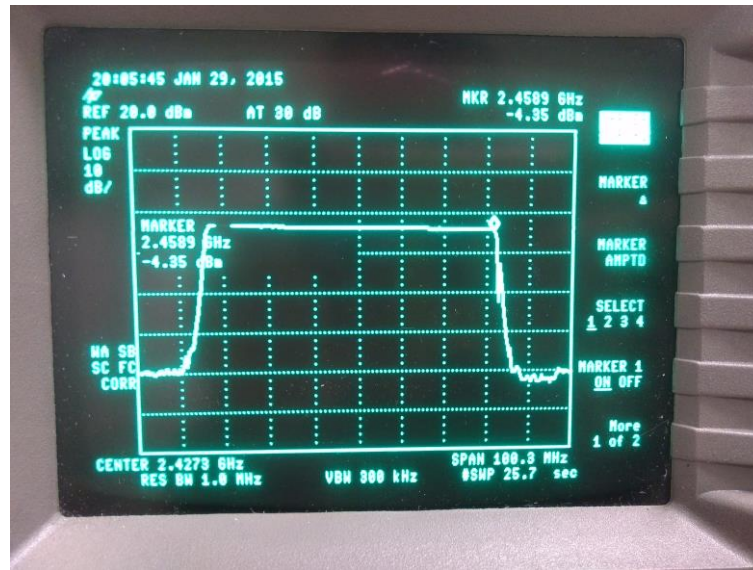


Figura 3.3.7: Ancho de banda en frecuencia en Analizador de Espectros

Una vez se obtiene la señal en frecuencia del VCO, se amplifica mediante el amplificador ZX60-272LN-S+ [20], también fabricado por Mini Circuits. Es necesario aumentar la potencia de la señal antes de su transmisión. La ganancia con la que amplifica la señal varía ligeramente en función de la frecuencia, que ronda los 14 dB. Para ello el amplificador es alimentado con una tensión de 5 voltios para su funcionamiento.

Una vez amplificada esta señal, pasa al *Splitter* (divisor) ZX10-2-42-S+ [21], también fabricado por Mini Circuits. La función de este componente es la de “separar” una pequeña muestra de la señal a transmitir, la cual se envía directamente al mezclador. El resto de la señal es transmitida por la antena. La operación anterior implica una pérdida de potencia, que el fabricante establece en alrededor de los 3 dB variando ligeramente con la frecuencia, siendo 3.26dB la atenuación con las frecuencias que utilizamos.

La señal es a continuación guiada hasta la antena de transmisión.

3.3.3 Antena de transmisión y recepción

Una vez tenemos la señal amplificada y pasando por el repartidor, solo queda enviarla al medio. Para ello, será necesario antenas que transmitan en el rango de frecuencias alrededor de los 2,4 GHz. Esta antena será necesaria tanto para transmisión de la señal como para su recepción posterior.

Una vez montado el circuito de radiofrecuencia, el siguiente paso fue colocarlo en un soporte de madera (aportado por el servicio de carpintería de la Escuela Naval) junto con las dos antenas.

La principal ventaja de trabajar en la banda de 2,4 GHz no es únicamente que sea una banda libre sino que además hay una gran disponibilidad de antenas ya que se trata de una de las bandas que emplea WiFi. Lo único que era necesario era escoger una antena WiFi direccional adecuada, por lo que se optó a escoger la que cumpliera con los requerimientos necesarios y fuera económica.

Finalmente la antena escogida fue la antena TL-ANT2409A [25], fabricada por la marca TP-LINK. Otros proyectos similares han utilizado latas metálicas como antenas, e igualmente se podría hacer con este radar, pero estas antenas nos proporcionan una mayor potencia de transmisión además de una mayor ganancia.

En concreto, estas antenas se tratan de antenas de polarización vertical, un rendimiento (potencia) de 9dBi, ancho de haz a 3dB en el plano horizontal y diseñadas para trabajar en la frecuencia de 2,4Ghz. Estas especificaciones son más que adecuadas para este proyecto.

☉ Radiation Patterns:

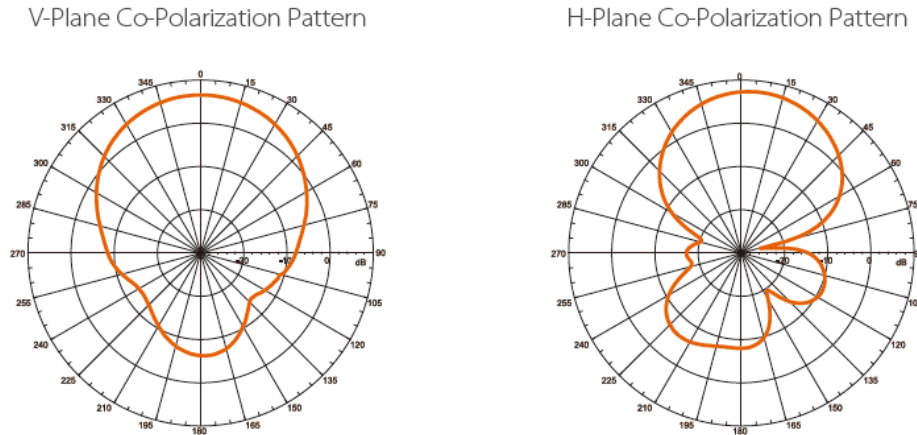


Figura 3.3.8: Diagrama de radiación de las antenas [26]

3.4 Etapa de recepción (Circuito radiofrecuencia y etapas de amplificación y filtrado)

3.4.1 Circuito de radiofrecuencia (recepción)

Una vez transmitida la señal al medio, esta se refleja en el objeto y vuelve al radar. La antena de recepción es la encargada de recibir esa señal y enviarla al circuito de radiofrecuencia. Esta señal, si bien nos aporta la información que necesitamos, no está tratada por lo que será necesario su paso por un amplificador y llegue al mezclador con el cual obtendremos la señal que realmente nos interesa.

Una vez hemos recibido la señal por la antena, es pasada por un amplificador de bajo ruido. La señal que recibimos, teniendo en cuenta que es la señal reflejada en el objeto, es muy débil por lo que será necesario amplificarla y la mejor opción para no empeorar la señal es un LNA (*Low Noise Amplifier*). En este caso, se trata del mismo amplificador utilizado en la etapa de transmisión, el amplificador ZX60-272LN-S+ [20] fabricado por Mini Circuits. Esta señal es entonces enviada al mezclador.

A este mezclador está conectado el divisor (el cual envía una muestra de la señal transmitida) y la antena de recepción. El mezclador utilizado es el ZX05-43MH-S+ [22], fabricado también por Mini Circuits. Otro de los fundamentos en los que se basa el radar es la comparación de la frecuencia recibida con la frecuencia transmitida, mediante el batido de ambas (Ver apartado 2.2). Por supuesto, esta conversión tendrá una atenuación en función de la frecuencia de la señal de referencia y la frecuencia de la señal de recepción (así como la potencia con la que llegue cada una. Funciona entre los 824 MHz y 4200 MHz (siendo nuestra frecuencia de trabajo 2400 MHz).

La señal obtenida tras el paso por el mezclador es la señal se envía al amplificador y el filtro.

El montaje de los componentes entre si se realiza roscando las puertas de unos con otros como muestra la figura 3.4.1



Figura 3.4.1: Imagen del circuito de radiofrecuencia [19] [20] [21] [23] [24] [25]

3.4.2 Filtro de paso bajo y amplificador

Una vez obtenemos la señal de la salida del mezclador es necesario realizar dos acciones: amplificarla y filtrarla. La señal de salida del mezclador es muy débil (del orden de los 100mW de amplitud) por lo que es necesario amplificarla y posteriormente filtrarla con un filtro de paso bajo para eliminar todas las frecuencias no deseadas (hay que tener en cuenta las limitaciones de la tarjeta de audio).

Para realizar los diseños me existen muchos programas en internet que ayudan a diseñar el filtros (en este caso un filtro de paso bajo de 15 KHz). Entre los diferentes programas, destacar Filter Pro Desktop de Texas Instrument, Filter Wizard [27] y Webench [28] (también de Texas Instrument) siendo estos dos últimos de uso online. Especial mención al PSIM [29] que fue el programa utilizado para descartar diferentes diseños y seleccionar finalmente el que se utilizará. Se utilizó en última estancia las dos versiones online para confirmar los resultados obtenidos mediante la simulación en el PSIM.

En la figura 3.4.2 se muestra una simulación mediante WEBENCH [15] del filtro empleado. En ella se observa la respuesta en frecuencia del filtro en la que podemos ver en el eje horizontal la frecuencia en KHz y en el eje vertical su atenuación en dB.

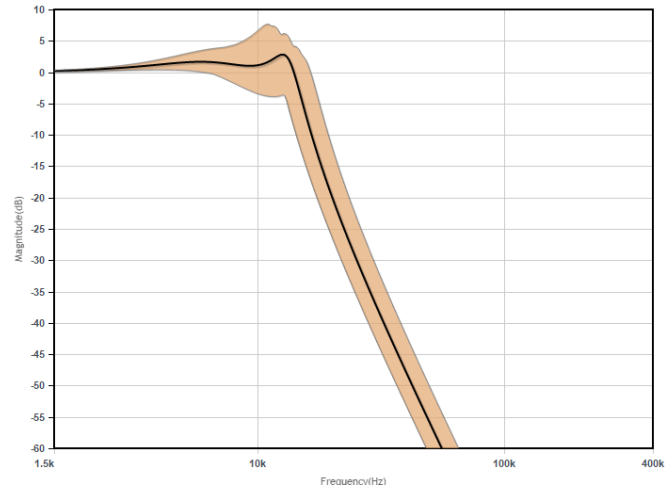


Figura 3.4.2: Simulación del filtro de paso-bajo con frecuencia de corte en 15KHz [15]

Las simulaciones permitieron obtener un filtro realizable de tipo Butterworth formado por dos etapas de filtro Sallen-Key modificado con una frecuencia de corte de 15KHz. Las características del filtro diseñado se muestran a continuación:

-Comportamiento del filtro Butterworth: Se ha elegido este tipo de filtro por tres razones: La simplicidad a la hora de construirlo, la acusada pendiente en frecuencia (lo que significa una mayor disipación de potencia para frecuencias no deseadas) y por la ausencia prácticamente de rizado (ondulación previa a la pendiente en frecuencias menores) si bien no es un parámetro crítico en este proyecto

-Frecuencia de corte: Se trata de la frecuencia a partir de la cual la amplitud de la señal ha caído a la mitad de su valor máximo (o lo que es lo mismo, 3dB). He escogido 15KHz como frecuencia de corte ya que la gran mayoría de las tarjetas de audio tienen un ancho de banda de 15 KHz.

-Filtro Sallen-Key: Es una implementación concreta de filtro que se caracteriza fundamentalmente por su simplicidad. Está únicamente compuesto por resistencias, condensadores y un amplificador. La respuesta con una sola etapa puede no ser suficiente para cumplir las restricciones del filtro, sin embargo, podemos colocar varios en cascada de forma el resultado global mejore. Aun así, no se puede conseguir la pendiente deseada (la frecuencia de corte deseada) con un filtro Sallen Key simple, por lo que se han realizado algunas modificaciones.

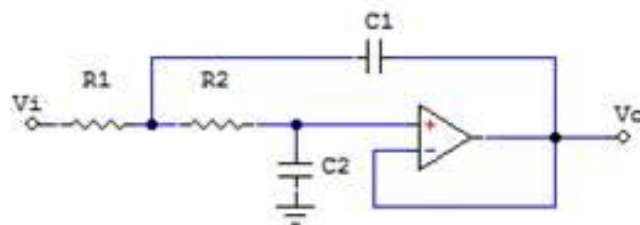


Figura 3.4.3: Filtro Sallen Key simple [16]

Para la construcción, se utilizó una proto-board y componentes electrónicos disponibles en el Laboratorio de Física del Centro Universitario de la Defensa. Después de diseñar y construir varios prototipos, se caracterizó la respuesta en frecuencia que tenía cada uno de ellos. Para realizar estas pruebas es necesario un generador de señal que nos permitió crear una señal senoidal (previo ajuste de

su frecuencia, amplitud y offset), y auxiliándose con un osciloscopio se analizó el comportamiento de la señal en las diferentes etapas.

Esta ha sido una de las partes más complejas del radar, debido a la falta de experiencia en el diseño y montaje de circuitos eléctricos y al encontrar que la respuesta obtenida por estos sistemas no se ajustaba a lo diseñado previamente por las herramientas informáticas. Se realizaron cinco circuitos diferentes modificando cada uno de ellos para obtener la señal esperada. Si bien con los cuatro primeros no se consiguió el resultado esperado, se fueron adquiriendo conocimientos para ajustar y montar el circuito con mayor soltura. Un fallo común a casi todos los diseños es la aparición de un recorte en la señal que provocaba una distorsión (como se muestra en la Figura 3.4.4).

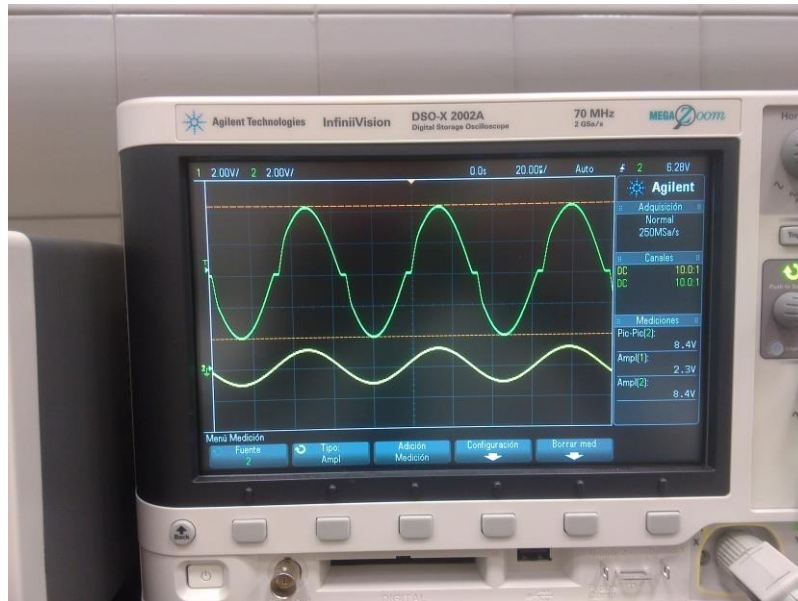


Figura 3.4.4: Recorte de la señal amplificada a nivel de Tierra

Finalmente, con el quinto diseño se consiguió una amplificación y filtrado correcto obteniendo la ganancia prevista de todo el conjunto (17 veces). Por ejemplo se obtenía una señal de 1,7V de amplitud introduciendo una señal de 100mV.

Una vez conseguido esto, el siguiente paso consistió en trasladar este mismo circuito realizado en la proto-board a un circuito perforado, para mejorar su presentación y manejabilidad. He de decir, que si bien este filtro/amplificador funcionaba correctamente trabajando de forma independiente, una vez se conectaba al ordenador la señal desaparecía.

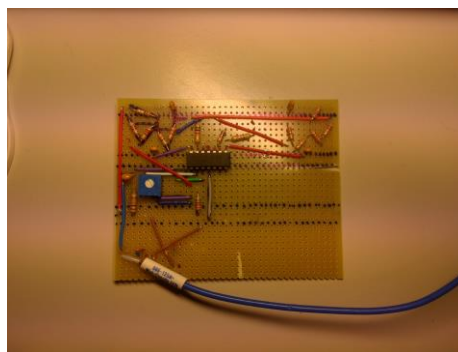


Figura 3.4.5: Imagen del filtro/ amplificador

Estudiando las posibles explicaciones a este fenómeno, se llegó a la conclusión de que la impedancia de salida del circuito era muy pequeña o que la amplificación no era lo suficientemente grande. Hizo falta por tanto rechazar este filtro/ amplificador y diseñar uno nuevo.

El nuevo diseño consistió únicamente en variar algunas etapas del filtro y del amplificador de forma que me permitiera incluir una mayor impedancia de salida y una etapa de mayor amplificación. Tras diseñarlo en la proto-board, se probó en el radar para comprobar si el resultado simulado y el experimental eran el mismo y una vez comprobado que así era, se procedió a soldarla en un circuito perforado. El nuevo circuito amplifica del orden de 45 veces (16.5dB) por lo que una señal de entrada de amplitud 100mV se obtiene 4,7 V a la salida, siendo además la impedancia de salida la correcta. Puse a funcionar el radar y tras la depuración de algunos fallos conseguí la señal deseada.

En la imagen a continuación se muestra el circuito perforado utilizado para instalar los siguientes circuitos:

- Circuito de filtrado (Etapa 1 y Etapa 2)
- Circuito de amplificación
- Convertidor DC-DC 12V a 5V
- Divisor de tensión de 5V a 500 mV

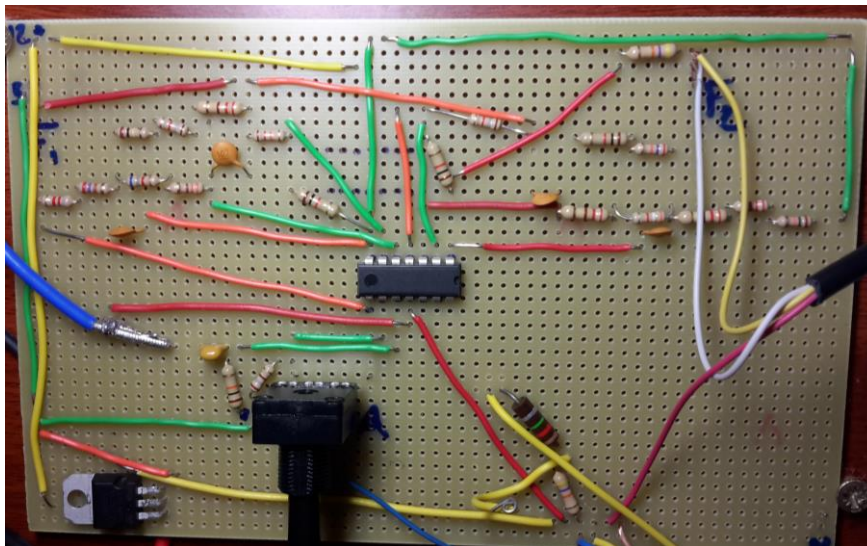


Figura 3.4.6: Amplificador, Filtro (dos fases) y divisor de tensión

3.4.3 Alimentación del radar

La electrónica asociada al radar y la cadena de RF emplean tensiones de alimentación de 12 y 5 voltios de continua. El carácter portátil del radar obligaba a realizar un estudio de las posibilidades de alimentación. Estas dos tensiones pueden obtenerse mediante dos baterías diferentes que proporcionen ambas alimentaciones. Sin embargo, se optó por una solución mejor: alimentar con una batería de 12 voltios y emplear un conversor DC-DC para obtener una tensión reducida de 5V.

La batería escogida fue una batería estándar de plomo-ácido de 7 Ah (la batería DJW12-7.0 [26]) que permite una gran autonomía, su recarga es sencilla y además es económica. Su único inconveniente es el peso.

3.5 Equipos utilizados para realizar mediciones

Para realizar el montaje de todo el circuito han sido necesario equipos aportados por el CUD y por el CEMEDEM utilizándolos para comprobar el funcionamiento general. Han sido necesarios equipos para alimentar el circuito, para simular señales y equipos de medición. Son los que a continuación se detallan:

3.5.1 Osciloscopio DSO-X-2002-A

Es un osciloscopio de la marca Agilent que puede operar desde DC hasta los 200 MHz. Con este tipo de osciloscopio se pueden realizar capturas de pantalla y en este modelo el CUD dispone del modelo de 2 y 4 canales. [31]

Es un equipo fundamental para comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas además de analizar la reacción de la señal por los distintos circuitos.

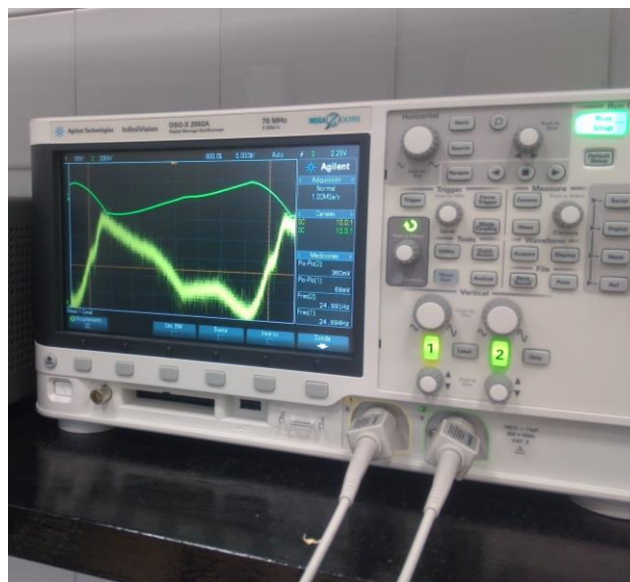


Figura 3.5.1: Osciloscopio DSO-X-2002-A

3.5.2 Generador de funciones AFG-2005

Este generador de funciones pertenece a la marca Instek. Permite generar señales senoidales, triangulares, rectangulares entre otras. Los principales parámetros que permite modificar son la frecuencia, la amplitud de la señal y el Offset. [32]

Este equipo es muy útil a la hora de comprobar el correcto funcionamiento del oscilador y asegurarse del correcto funcionamiento de la etapa de filtrado y la de amplificación.



Figura 3.5.2: Generador de funciones AFG-2005

3.5.3 Fuente de alimentación Tenma 72-8690

Se trata de un alimentador de la marca Tenma que funciona entre 0 -32 V y 0 -3 Amperios. Permite funcionar como dos fuentes de alimentación independientes o bien como dos esclavas. [33]

El equipo se ha utilizado en prácticamente todas las etapas del circuito para proporcionar la alimentación necesaria y sobre todo para los circuitos electrónicos ya que necesitan fuentes de alimentación distintas (12V y 5V)



Figura 3.5.3: Fuente de alimentación TENMA 72-8690

3.5.4 Analizador de espectro HP 8593E

Este Analizador de espectro pertenece a la marca HP y funciona entre 9 KHz y 22GHz. Además de permitir medir la frecuencia de la señal, permite ver el ancho de banda que ocupa, el barrido, la potencia de la señal, la frecuencia media, etc.... [34]

Es un equipo necesario para calibrar el funcionamiento del circuito de radiofrecuencia entre las frecuencias deseadas además de la comprobación de que la señal obtenida es la requerida.

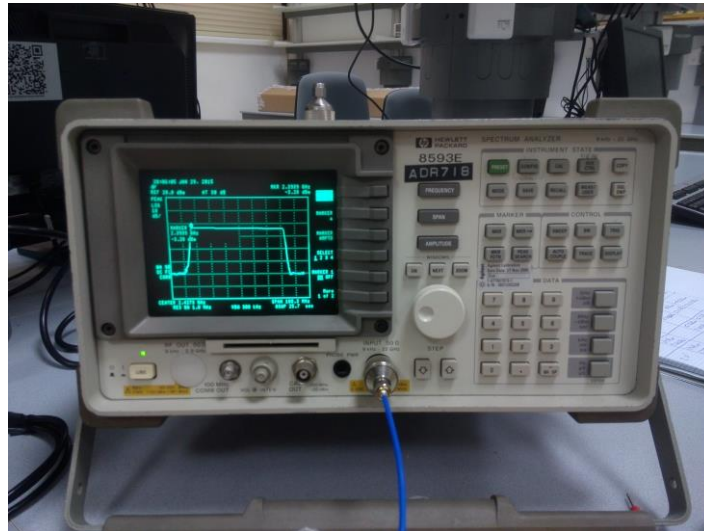


Figura 3.5.4: Analizador de espectro HP 8593E

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 PRUEBAS

En este tipo de circuitos es necesario comprobar fase a fase que cada parte cumple su función para descartar y diseñar la parte que este fallando. Como se mencionó anteriormente, se diseñaron y construyeron hasta cinco diseños diferentes antes de elegir uno definitivamente. Para cada uno de ellos se hicieron las medidas necesarias para localizar el fallo y/o descartarlo.

Además del filtro/ amplificador, también fue necesario medir con el osciloscopio la señal del generador de rampa y pulsos. Para el generador de rampa, fue especialmente importante a la hora de comprobar el correcto funcionamiento de la programación e ir ajustando hasta conseguir la señal deseada. Además también fue necesario comprobar que la señal de disparo estaba efectivamente sincronizada con la rampa ascendente y descendente. Gracias a estas mediciones se pudo ver que efectivamente la señal de disparo del Arduino variaba entre 0V y 5V (salida digital en este punto se observó que la señal de disparo interfería en la señal recibida, por lo que se decidió disminuir la amplitud de la señal de disparo mediante la construcción de un divisor de tensión que permitiera pasar los pulsos de 5V a 500mV).

Se empleó un voltímetro para comprobar que todos los circuitos independientes estaban correctamente alimentados y que cada uno estaba correctamente aislado de los demás.

Además del osciloscopio, fue necesario el uso de un analizador de espectro para comprobar el correcto funcionamiento del circuito de radiofrecuencia (frecuencia intermedia, excursión en frecuencia, potencia en cada una de las fases, etc....).

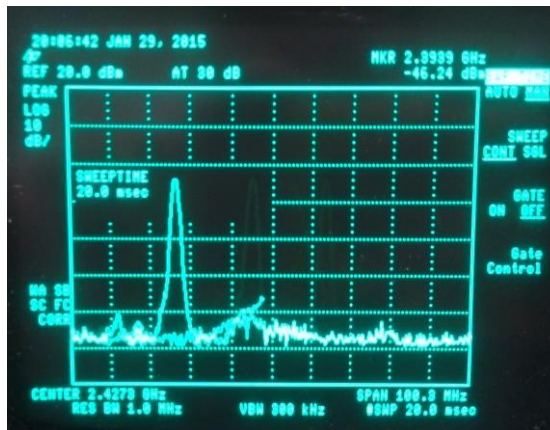


Figura 4.1.1: Muestra de la frecuencia transmitida por el analizador de espectro

4.2 Adquisición de datos

Una vez se hubo comprobado el correcto funcionamiento de cada una de las partes del radar, se procedió a hacer pruebas del conjunto del mismo. Lo que se pretende en esta etapa es capturar la señal recibida por el radar y convertirla en un fichero audio, de tal forma que pueda ser posteriormente procesada. Para ello se realizaron dos pruebas. Primero se transmitió la señal sin modular (con frecuencia fija), lo cual permite fácilmente medir velocidad y en segundo lugar con la señal modulada, que permitirá determinar también distancia.

Como se ha comentado previamente, la primera prueba que se realizó no funcionó. El problema residía en que la señal rectangular llegaba sin problemas y con la potencia necesaria, sin embargo, no era así para la señal de salida del filtro. Cuando el filtro trabajaba independientemente, se obtenía un resultado de 1,7V de amplitud de señal, mientras que al ordenador le llegaban una amplitud de mV. Investigando se llegó a la conclusión de que podía tratarse de un problema de la impedancia de salida. Como solución se rediseñó y construyó una nueva fase de amplificación y filtrado que permitió aumentar la impedancia de salida. Una vez realizado esto, el sistema funcionó correctamente.

4.2.1 Adquisición de la frecuencia Doppler

La frecuencia Doppler es el cambio de frecuencia aparente debido al movimiento en acercamiento o alejamiento de un blanco. Dado que es directamente proporcional a la velocidad del blanco, será el parámetro que se utilice para obtenerla.

Las primeras pruebas se realizaron en el laboratorio de Electricidad usando dos programas muy similares entre sí, el Sigview [36] y el Audacity [37]. Ambos programas permiten realizar capturas de audio de dos canales (si bien para velocidad solo es necesario la utilización de un canal) y controlar el número de muestras que se deseen tomar.

Para realizar la primera prueba, es necesario desconectar el generador de rampa de tal forma que el oscilador genere una onda continua (frecuencia fija) correspondiente a la tensión de 0V, que en este caso se corresponde con una frecuencia de 2'243 GHz. Una vez se transmite esa señal, es recibida por la antena de recepción, amplificada y enviada al mezclador, el cual envía la señal al ordenador pasando por el filtro.

Una vez obtenido ese resultado, se comienzan a realizar prácticas con blancos en movimiento (en este caso una persona en acercamiento y alejamiento) comprobando la variación en frecuencia. Ante

un blanco que se desplaza a baja velocidad, la variación en frecuencia es pequeña y conforme este aumenta su velocidad, la frecuencia va aumentando.

Con el analizador de espectro del Sigview se puede ver la variación de la frecuencia debida al blanco así como la intensidad de la señal recibida.

Al estar trabajando en una banda utilizada en WiFi, es importante desconectar todos los transmisores WiFi circundantes para perturbar lo mínimo posible el radar.

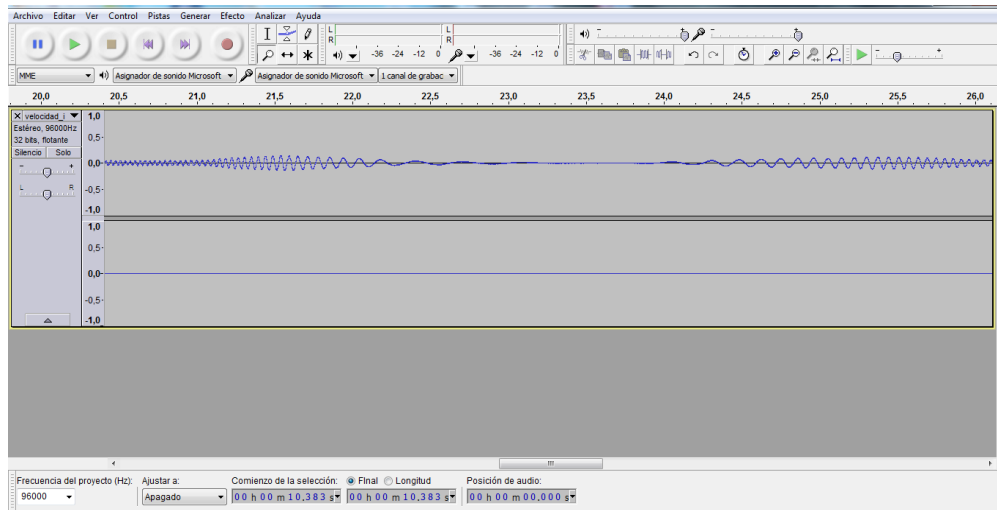


Figura 4.2.1: Captura Doppler (Audacity)

En la Figura 4.2.1 se puede observar la variación de la frecuencia en función del movimiento de un blanco. En este caso la captura de audio se corresponde con un experimento en el cual un coche se acerca al radar con una velocidad constante de 10 Km/h, para delante del radar durante casi 1 segundo y retrocede a una velocidad similar.

4.2.2 Adquisición de datos para cálculos de distancia

Para realizar estas mediciones, será necesario conectar el generador de rampa con el fin de modular la señal. En este caso ya no estaremos emitiendo una señal en una sola frecuencia sino que se transmitirá una señal triangular en frecuencia con un canal de disparo de forma que tengamos una referencia con la cual poder obtener distancia.

Por el hecho de modular la señal, vamos a estar transmitiendo con una cierta frecuencia que se puede calcular sabiendo que:

$$\frac{1}{T} = f \quad \text{donde: } \begin{cases} T = \text{Periodo de la señal (s)} \\ f = \text{frecuencia de la señal(Hz)} \end{cases}$$

Ecuación 4.2.2.1

Por lo tanto, sabiendo que la señal triangular que se quiere transmitir tiene un periodo de 40ms (20ms rampa ascendente y 20 ms rampa descendente) la frecuencia de la señal será de 25 Hz. Los programas de Sigview y Audacity son muy útiles para realizar capturas de audio pero no lo son tanto a

la hora de representar la frecuencia recibida así como su variación por lo que para esta medición será necesario la utilización del osciloscopio.

En la Figura 4.2.2 se puede observar un ciclo la señal modulada “triangular” transmitida (color verde) y la señal recibida (color amarillo). Como se puede observar, la señal se recibe deformada (si bien guarda relación con la señal enviada) y con una ligera variación en frecuencia provocada por un blanco en movimiento.

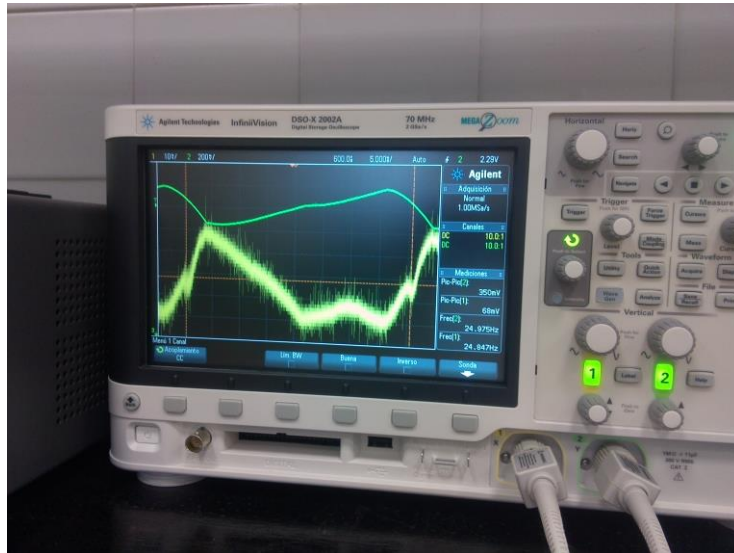


Figura 4.2.2: Comparación señal transmitida y señal recibida

Una vez comprobado que sin movimiento la onda permanece plana y ante movimiento varía la frecuencia de la señal, se procede a tomar muestras de un blanco en alejamiento y en acercamiento. Al contrario de las tomas de velocidad, el resultado obtenido en este caso no es apreciable a simple vista viendo la variación en frecuencia ya que siempre se tiene al menos una señal de 25 Hz y la variación en frecuencia vendrá dada por encima y por debajo de esta. La forma de hacer la captura es la misma, utilizando Sigview o Audacity, se hace una captura de audio de los dos canales seleccionando la frecuencia de muestreo que se Siempre se ha utilizado una velocidad de muestreo de 96 KHz que es la máxima frecuencia a la que puede operar la capturadora de audio del ordenador.

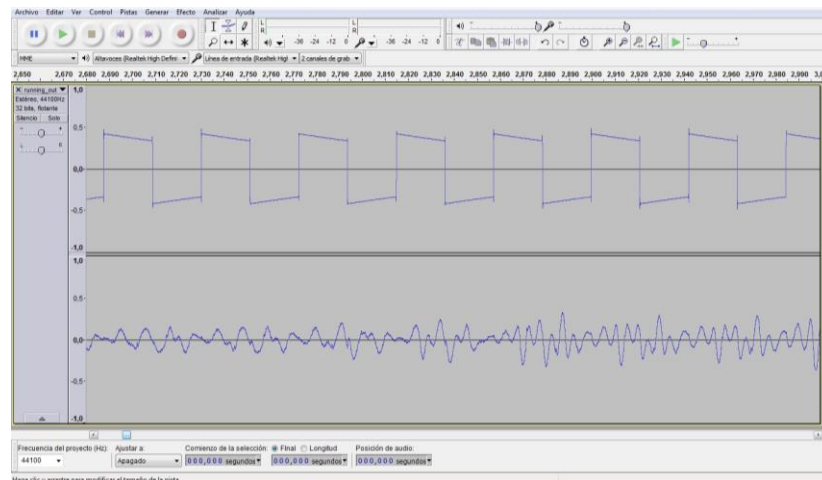


Figura 4.2.3: Captura audio dos canales con Audacity

En la imagen se puede observar que ya no se utiliza únicamente un canal, sino que ya se utiliza tanto el canal de la señal de disparo como para la señal de la salida del filtro. La señal de disparo permanece constante ya que sirve únicamente como referencia mientras que la señal de la salida del filtro variará en frecuencia en función de la distancia del blanco y su velocidad

4.3 Procesamiento e interpretación de los datos

Hasta ahora, se ha conseguido recibir la señal de salida del filtro en el ordenador capturando la señal en forma de archivo de audio. Una vez conseguido esto, es necesario interpretarla para obtener velocidad y distancia de esas muestras. Para ello es necesario la aplicación de las ecuaciones antes mencionadas (Apartado 2.2), mediante el uso de Matlab.

El procesamiento de la señal se hace a partir del fichero de audio antes realizado. Para ello las capturas audio se guardan en ficheros tipo WAV para su posterior procesamiento. Estas muestras serán aptas tanto para velocidad como para distancia, según el código que apliquemos en Matlab.

Matlab, permite programar las funciones de procesado necesarias para estimar la distancia y la velocidad mediante dos algoritmos diferentes que guardan muchas similitudes. Dado que ya hay experimentos similares a este, los códigos para Matlab ya existen pero será necesario programarlos para adaptarlos a las características de este radar (frecuencia intermedia, ancho de banda, amplitud, periodo, señal de disparo etc.)

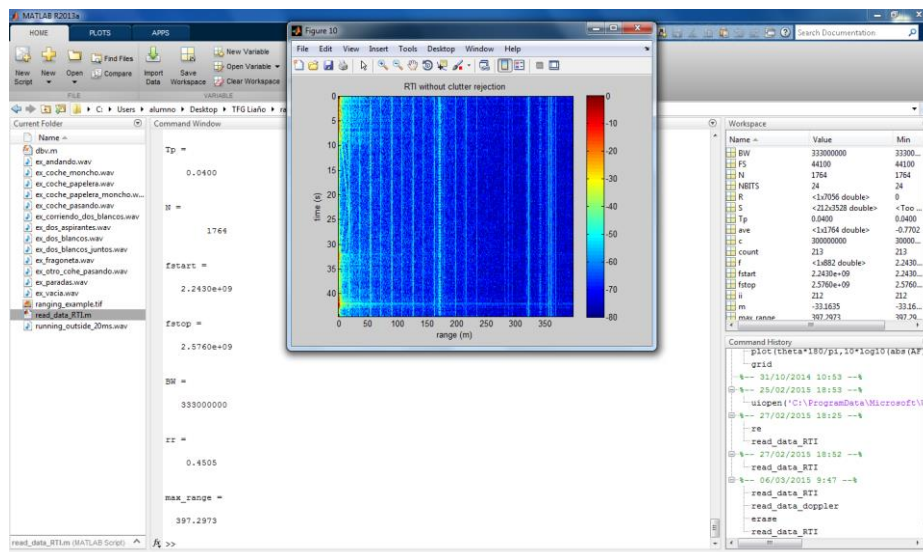


Figura 4.3.1: Captura pantalla empleo Script de distancia

4.3.1 Procesamiento para obtención de velocidad y distancia

Para la captura de velocidad no es necesaria una referencia de tiempo por lo que se puede obviar la señal de disparo. Por tanto, solo será necesario procesar un único canal. Si bien se pueden asignar resultados aproximados observando la frecuencia recibida (sabiendo que X Hz se corresponden con Y m/s), es mucho más preciso utilizar Matlab para introducir en el código las ecuaciones necesarias.

Por tanto, una vez programado el código lo único necesario será introducir en dicho código el nombre del archivo que se desea abrir y direccionar la carpeta en la cual se encuentra dicho archivo. Empleando el *script* de Matlab “Doppler.m” se abre el archivo, se procesa y da como resultado una gráfica de la velocidad.

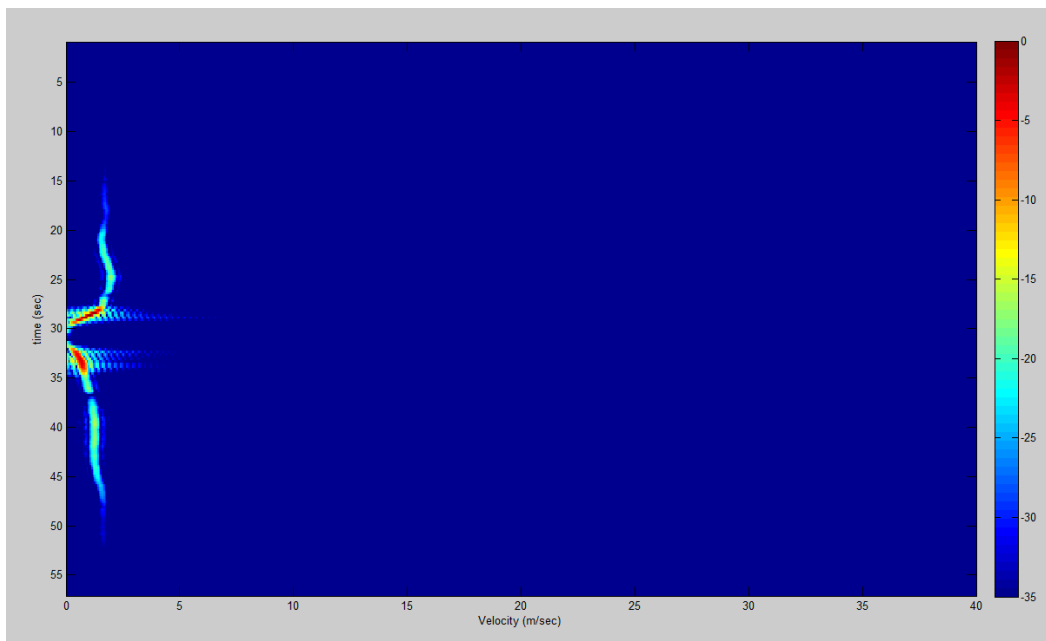


Figura 4.3.2: Velocidad coche en acercamiento, parada y alejamiento

En el eje vertical está representado el tiempo y en el horizontal la velocidad expresada en m/s. Para realizar estos cálculos, es necesario saber de antemano la velocidad real del blanco para poder compararla con la obtenida. La Figura 4.3.2 representa un coche acercándose a 7 Km/h y alejándose posteriormente a la una velocidad ligeramente inferior (3'5Km/h) correspondiente a una prueba realizada con un vehículo propio en la explanada de la Escuela Naval Militar

Para comprobar la exactitud en la detección de velocidad se repite el experimento pero a mayor velocidad. El resultado se puede observar en la figura 4.3.3

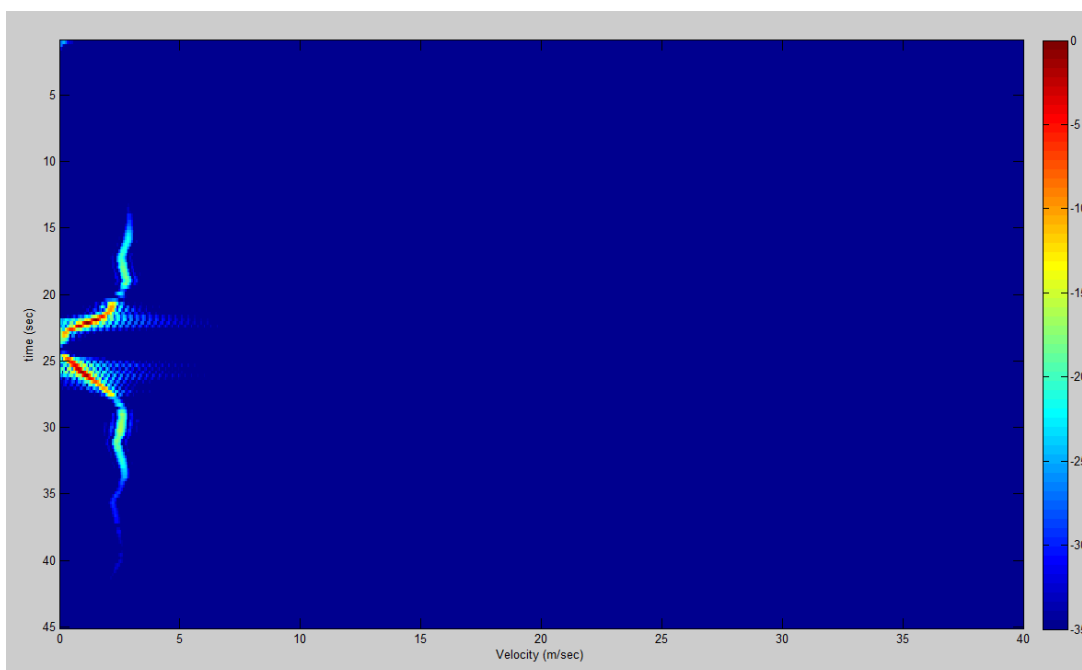


Figura 4.3.3: Coche en acercamiento y alejamiento

La Figura 4.3.3 representa un coche acercándose a 10 Km/h y alejándose posteriormente a la una velocidad similar correspondiente a una prueba realizada con un vehículo propio en la explanada de la Escuela Naval Militar.

Para la medición de distancia se realiza el mismo proceso, pero en este caso el código a utilizar será el *script* de Matlab “Range.m”. Al ejecutarlo, aparecerá en una gráfica, quedando representado en el eje vertical el tiempo y en el eje horizontal la distancia.

En este apartado se pueden realizar muchas medidas. A continuación se muestran algunas de ellas:

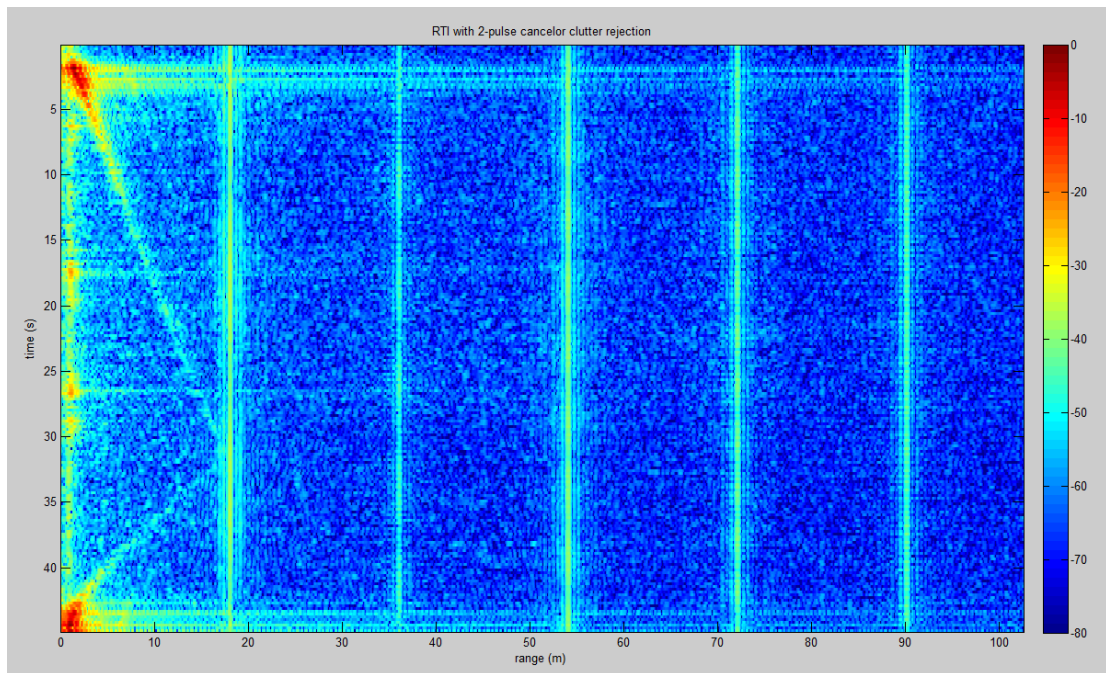


Figura 4.3.4: Blanco alejandose andando y vuelta corriendo

En la Figura 4.3.4 se puede apreciar una persona que comienza a alejarse andando (a velocidad constante) que cuando llega a una distancia predeterminada, comienza a acercarse corriendo.

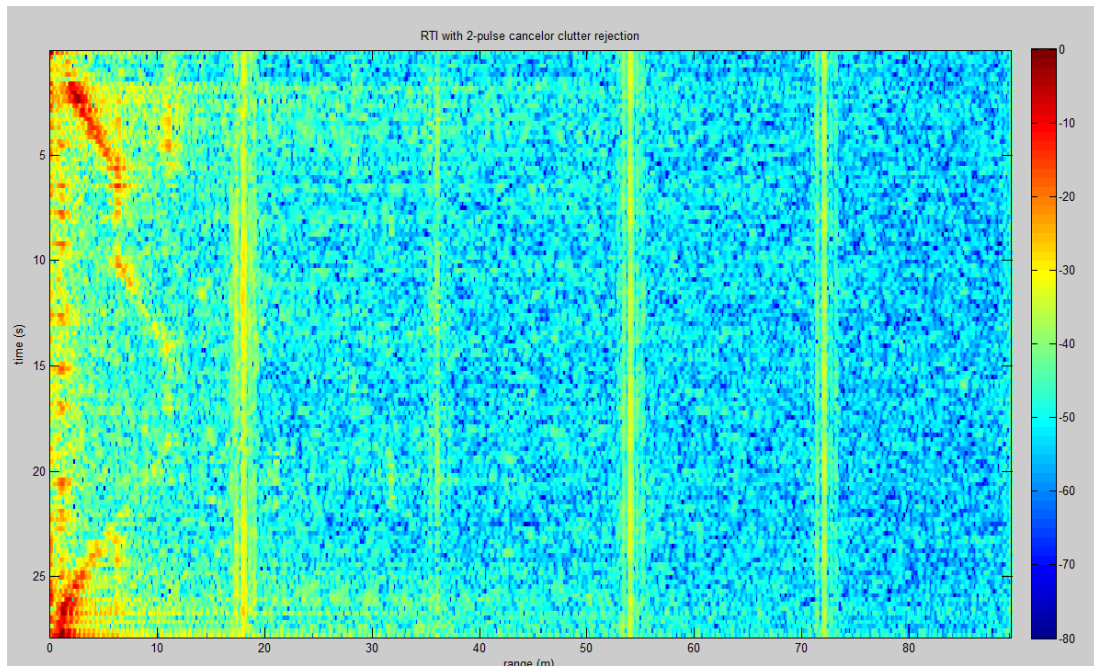


Figura 4.3.5: Persona alejandose y acercandose haciendo paradas

En la Figura 4.3.5 se puede observar una persona que comienza a andar en alejamiento realizando una parada a los 7 metros y otra a los 12 metros volviendo después andando.

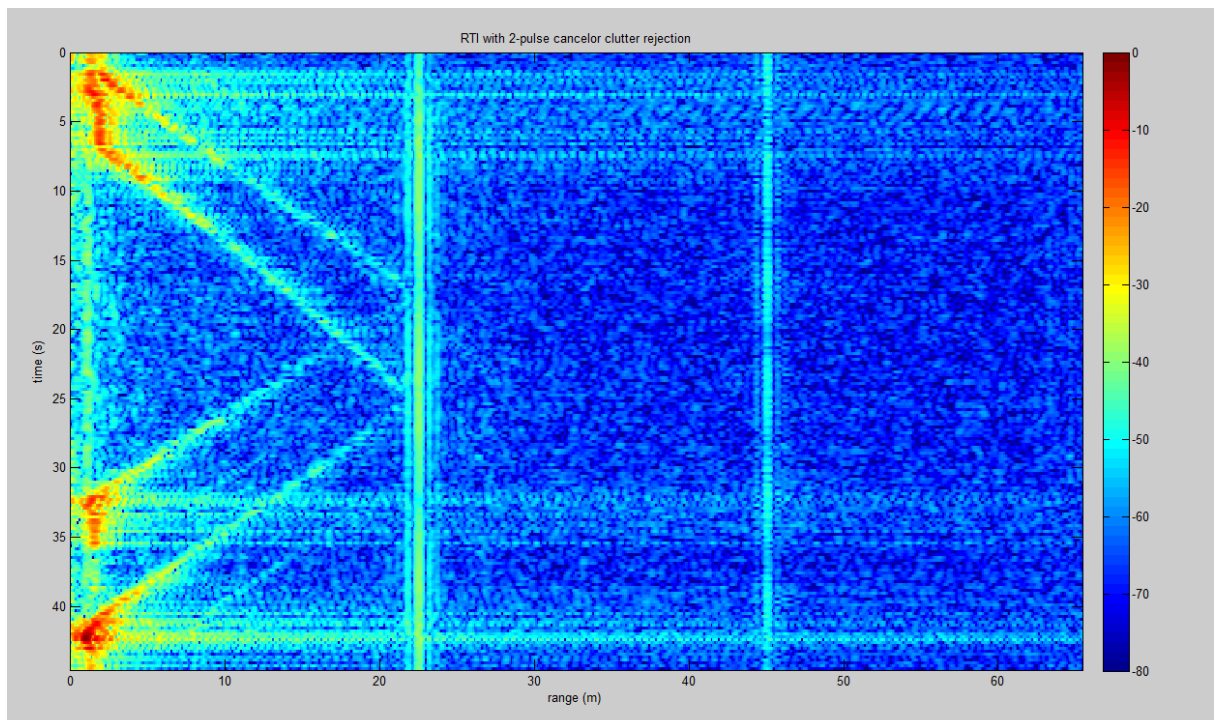


Figura 4.3.6: Dos blancos corriendo en alejamiento y acercamiento

En la Figura 4.3.6 quedan representados dos personas alejándose y acercándose. Los dos blancos están dispuestos de forma simétrica al radar (a la misma distancia del radar pero en lados contrarios).

El blanco 1 comienza a alejarse mientras que el blanco 2 espera antes de hacerlo, los dos blancos a una misma distancia prefijada (manteniendo la distancia lateral en todo momento) y vuelven.

Además se han hecho otros ejemplos interesantes como el que a continuación se muestra:

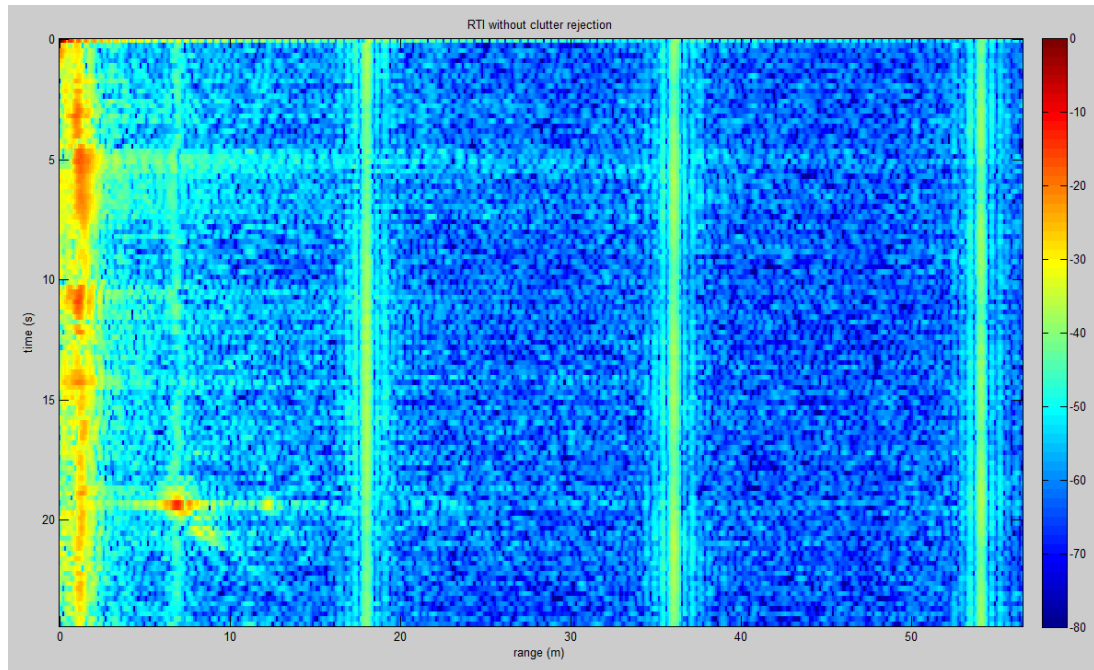


Figura 4.3.7: Coche pasando a una distancia de 9 metros del radar

En la figura 4.3.7 se puede apreciar la representación en distancia de un coche pasando a gran velocidad a una distancia de 9 metros.

Se incluyen a continuación el Script de distancia y el Script de velocidad con unas notas aclaratorias:

```
% Procesado Velocidad vs. Tiempo

% TFG R. Liaño
% Fuente: "Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler,
% and Synthetic Aperture Radar Imaging"
% Gregory L. Charvat
clear all;
close all;
% Lee el fichero de audio .wav
[Y,FS,NBITS] = wavread('ex_coche_moncho.wav');

% Constantes
c = 3E8;           % (m/s) velocidad de la luz
% Parámetros del radar
Tp = 40E-3        % (s) duracion de la ventana de analisis
N = Tp*FS         % numero de muestras dentro de cada ventana de analisis
fc = 2590E6;     % (Hz) frecuencia central del VCO
%fc = 2495E6;    % (Hz) frecuencia central de la banda ISM
% Cambiamos de signo la señal porque viene invertida
s = -1*Y(:,2);   % este vector contiene la señal recibida
clear Y;
% contruimos el vector señal compuesto por trozos de duración N
for ii = 1:round(size(s,1)/N)-1
    sif(ii,:) = s(1+(ii-1)*N:ii*N);
```

```

end
% restamos la componente de tensión media de la señal
sif = sif - mean(s);
zpad = 8*N/2;
% realizamos la FFT
v = dbv(fft(sif,zpad,2)); % realizamos la FFT y pasamos los valores de amplitud a
dBs
S = v(:,1:size(v,2)/2); % como el resultado de una FFT es simétrico, tomamos
solo la mitad
m = mmax(max(v)); % calculamos la velocidad maxima

% calculo del vector de velocidades (m/s)
delta_f = linspace(0, FS/2, size(v,2)); % resolución doppler
lambda=c/fc;
velocity = delta_f*lambda/2; % calculo del vector de velocidades (m/s)

% calcula el vector de tiempos (s)
time = linspace(1, Tp*size(v,1), size(v,1));

% Visualización de resultados
% dibujamos un grafico de intensidad con amplitudes normalizadas
imagesc(velocity,time,v-mmax, [-35, 0]);
colorbar;
xlim([0 40]); % limites razonables del eje de velocidad
xlabel('Velocidad (m/s)');
ylabel('Tiempo (s)');
title('Velocidad vs. Tiempo');

```

Los perfiles distancia vs. tiempo pueden obtenerse realizando una FFT sobre las muestras de la señal recibida para cada barrido de frecuencias, es decir, troceando la señal recibida en tramos de duración la del tiempo de pulso tal y como indica la figura X. Estos perfiles se pueden “apilar” en el tiempo para obtener un espectrograma. Esto es precisamente lo que hace el código “procesa_distancia.m”

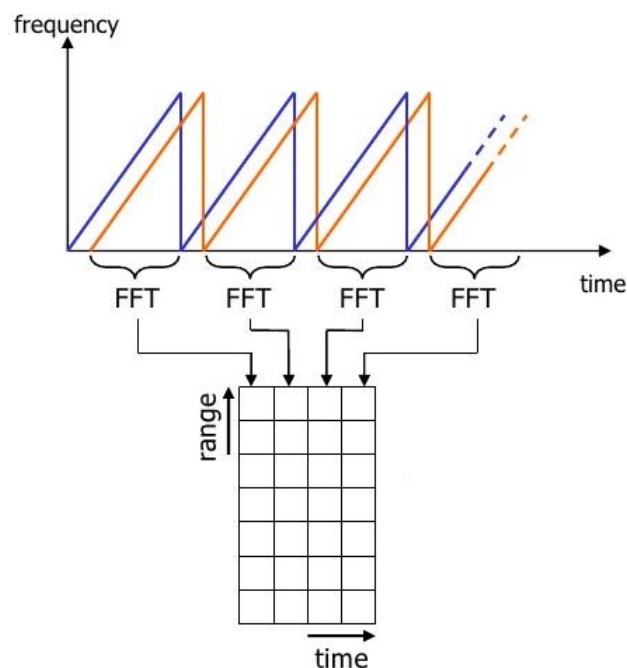


Figura 4.3.8: Aclaración gráfica FFT para obtener distancia vs tiempo

```

% Procesado Distancia vs. Tiempo

% TFG R. Liaño
% Fuente: "Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler,
% and Synthetic Aperture Radar Imaging"
% Gregory L. Charvat
clear all;
close all;
% Lee el fichero de audio .wav
[Y,FS,NBITS] = wavread('ex_coche_moncho.wav');

% Constantes
c = 3E8;           % (m/s) velocidad de la luz
% Parámetros del radar
Tp = 40E-3        % (s) duración de pulso
N = Tp*FS         % número de muestras por pulso
fstart = 2243E6   % (Hz) Frecuencia inicial de la rampa, límite inferior del VCO
fstop  = 2576E6   % (Hz) Frecuencia final de la rampa, límite superior del VCO
% fstart = 2402E6; % (Hz) Frecuencia inicial de la rampa, límite inferior de la
banda ISM
% fstop = 2495E6; % (Hz) Frecuencia final de la rampa, límite superior de la banda
ISM

BW = fstop-fstart % (Hz) Ancho de banda de transmisión
f = linspace(fstart, fstop, N/2); % vector con las frecuencias instantáneas
transmitidas

% Resolución en distancia esperable
rr = c/(2*BW);

% Distancia máxima no ambigua
max_range = rr*N/2;
% Cambiamos de signo la señal porque viene invertida
trig = -1*Y(:,1); % este vector contiene el canal de disparo
s = -1*Y(:,2);    % este vector contiene la señal recibida
clear Y;
% troceamos la señal recibida tomando como origen de los trozos
% el flanco ascendente de la señal de disparo
count = 0;
thresh = 0;
start = (trig > thresh); % este vector es de tipo booleano y contiene los
instantes de disparo
for ii = 100:(size(start,1)-N)
    if start(ii) == 1 & mean(start(ii-11:ii-1)) == 0
        count = count + 1;
        sif(count,:) = s(ii:ii+N-1); % este vector contiene en filas la señal
recibida de cada pulso transmitido
        time(count) = ii*1/FS; % este es el vector de tiempos
    end
end

% normalizamos el vector restando la media
ave = mean(sif,1);
for ii = 1:size(sif,1);
    sif(ii,:) = sif(ii,:) - ave;
end
zpad = 8*N/2;
% realizamos la FFT
v = dbv(fft(sif,zpad,2)); % realizamos la FFT y pasamos los valores de amplitud a
dBs

```

```

S = v(:,1:size(v,2)/2); % como el resultado de una FFT es simétrico, tomamos
solo la mitad
m = max(max(v));

% Visualización de resultados
figure(10);
% dibujamos un grafico de intensidad con amplitudes normalizadas
imagesc(linspace(0,max range,zpad),time,S-m,[-80, 0]);
colorbar;
ylabel('Tiempo (s)');
xlabel('Distancia (m)');
title('Distancia vs. Tiempo');

```

Aunque no se ha realizado en este TFG, es posible obtener perfiles distancia vs. velocidad realizando una FFT en dos dimensiones o bien con dos FFT de una dimensión: la primera se realizaría sobre las muestras de la señal recibida de cada barrido de frecuencias y daría como resultado el perfil de distancia vs. tiempo, y la segunda sobre las muestras correspondientes a la misma celda de distancia pero de diferentes barridos de frecuencia, lo que permitiría extraer la información doppler o de velocidad de los blancos. Esta operación se muestra en la figura Y.

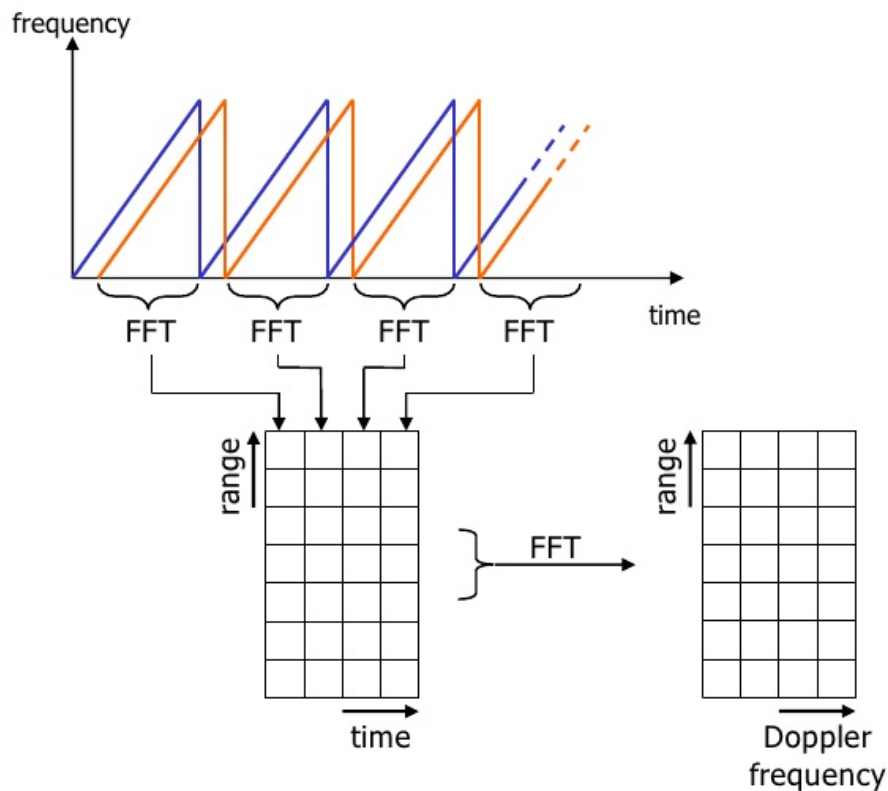


Figura 4.3.9:Aclaración gráfica FFT para obtner distancia vs velocidad

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Diagrama de Gantt

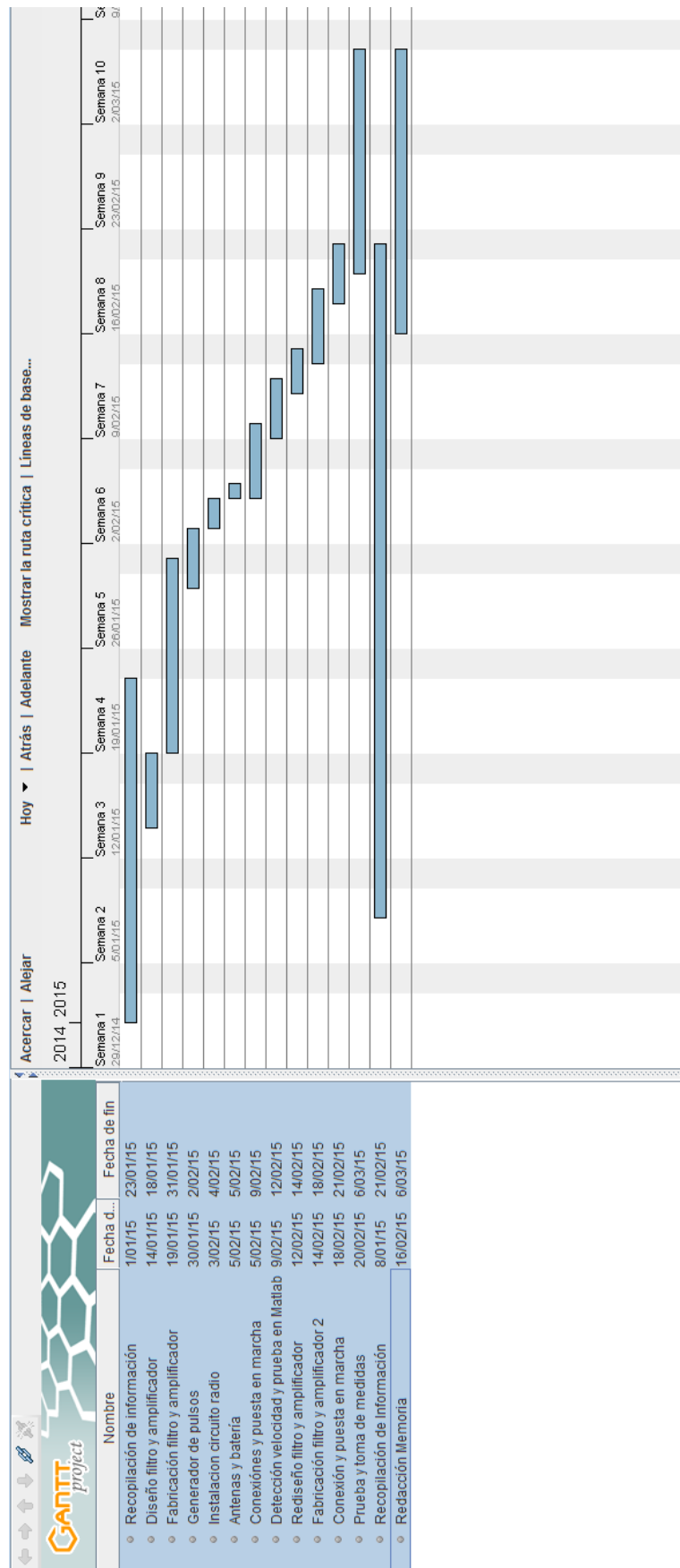


Figura 5.1.1: Diagrama de Gantt

Con el fin de mostrar el empleo de tiempo llevado a cabo para realizar este proyecto, se muestra en la figura 5.1.1 el diagrama de Gantt. Las tareas realizadas para la consecución de este trabajo son las que a continuación se detallan:

-Recopilación de información (22 días de duración): Es una parte fundamental del trabajo que aunque es cierto que está presente durante todas las fases, la mayor carga se produce en la etapa de diseño.

-Diseño filtro y amplificador (4 días): En esta etapa se decidió el tipo de filtro que se pretendía obtener y con qué respuesta.

-Fabricación del filtro y amplificador (11 días): Una vez se montaron varios diseños se llegó a un resultado adecuado si bien hubo que cambiarlo posteriormente.

-Generador de rampa (3 días): Es una parte muy delicada del circuito al ser la que genera la señal pero el software de Arduino es muy intuitivo, lo que agilizó mucho la tarea.

-Instalación circuito radio (2 días): Al ser todos los componentes de la marca Mini-Circuits no hubo problema en conectarlos entre si y posteriormente se fijaron al soporte.

-Antenas y batería (1 día): Fue necesario instalar las antenas en unos soportes adecuados para radiar de la manera deseada y colocar la batería.

-Conexiones y puesta en marcha (4 días): Una vez todos los componentes instalados, se alimentaron con la batería y conectaron entre ellos mediante soldadura.

-Detección velocidad (3 días): Una vez se comprobó que el sistema funcionaba correctamente, se puso en marcha para medir velocidades dentro del laboratorio.

-Rediseño filtro y amplificador (2 días): Sabiéndose ya los errores del primer filtro y las posibles causas, se procede a diseñar un nuevo filtro con una mayor impedancia de salida.

-Fabricación del segundo filtro / amplificador (4 días): Con el nuevo diseño ya listo, se procede al montaje del nuevo filtro asegurándose que cada fase cumple su función.

- Conexión y puesta en marcha (5 días): Se procede de nuevo a conectar todos los componentes entre sí y se comprueba que todo está correctamente alimentado y funcionando.

-Prueba y toma de medidas: (14 días): Con el sistema radar ya funcionando se procede a tomar medidas de velocidad y distancia en el Laboratorio de Electricidad y posteriormente en la explanada de la Escuela Naval Militar.

-Redacción Memoria (18 días): Si bien se han ido tomando notas en todas las etapas del proyecto, la memoria en si se puede considerar que comenzó una vez se comprobó que el radar funcionaba.

5.2 Problemas encontrados

5.2.1 El filtro / amplificador

Hay muchos programas en internet y otras herramientas también útiles como el PSIM, pero no todos están orientados al tipo de elementos que sean accesibles (integrados de amplificación que ya no se fabrican o resistencias con tolerancias muy grandes muy difíciles de encontrar). Además surge el problema de que un fallo a la hora de conectar el circuito o una mala conexión, evidentemente, hará que no funcione y suelen ser bastante difíciles de detectar. Remarcar en cualquier caso que es muy fácil equivocarse o no soldar bien un elemento. Por último, es importante tener en cuenta bajo qué

condiciones va a funcionar y a que va a estar conectado. Con esto me refiero a tener en cuenta diversos parámetros como la amplitud de la señal de entrada, la señal de salida que esperamos y la impedancia de salida (entre otros). Aunque se realizó una modificación al circuito para eliminar la componente continua de la señal y que esta no se trasladase a la siguiente etapa en realidad no era necesario ya que la entrada de línea de la tarjeta de audio la rechaza automáticamente.

5.2.2 *Generador de rampa/ pulsos*

La complicación de esta parte reside fundamentalmente en comprender como funciona la transmisión entre el DAC y el Arduino. Además es importante conocer las limitaciones del Arduino a la hora de programar la señal así como las limitaciones del DAC.

5.2.3 *Programación y toma de muestras*

Para realizar las medidas correspondientes es necesaria la utilización de varios programas. Hasta que se solucionan los errores la toma de muestras es complicada y es necesario entender adecuadamente el funcionamiento de estos programas para detectar los errores. Una vez habituado al manejo de estos programas (Sigview o Audacity) es muy simple realizar las capturas de audio, seleccionar la frecuencia de muestreo y convertirlo en el tipo de fichero deseado (WAV).

5.3 **Contrastación de los resultados**

Si bien el objetivo principal de este proyecto se ha alcanzado, la creación de un radar capaz de medir velocidad y distancia, es necesario fijarse en las limitaciones que tiene el radar:

- En primer lugar el tamaño. El radar está compuesto por algunos componentes cuyo tamaño es inevitablemente grande, pero otros que pueden reducirse como por ejemplo la batería o el propio Arduino
- Presentación: Un punto débil del proyecto es su aspecto físico, ya que se encuentra todo a la vista y por tanto es visible todo el cableado, el circuito de radiofrecuencia, el conjunto de componentes electrónicos, etc... además de estar expuesto a interferencias de otros equipos.

Por otro lado, también se han conseguido objetivos que en un primer momento no se daban por hechos como son:

- Alcance deseado cumpliendo la legislación. Según la legislación vigente, no se puede emitir en cualquier banda en cualquier potencia, si no que hay que ajustarse a unas bandas designadas y las potencias establecidas. En este caso se ha utilizado la banda libre ISM (2.4 GHz) que coincide con la banda "WiFi". Además ha sido necesario adecuar la potencia de transmisión a la establecida por ley, 30dBm.
- Implementación de mejoras gracias al Arduino. El microcontrolador Arduino ofrece muchas ventajas ya que, al ser este el generador de rampas, se puede modificar los parámetros de la señal fácilmente de tal forma, que no solo se puede cambiar la frecuencia o la amplitud de la señal, sino que además se puede cambiar la forma de la señal, de tal forma que se pueden generar señales de dientes de sierra, triangulares, senoidales, rectangulares, multifrecuencia, etc.

5.4 **Líneas futuras**

Una de las principales motivaciones que me empujaron a elegir este proyecto, fue el enorme abanico de líneas futuras que ofrece una vez terminado. Surgen muchas y muy diversas aplicaciones

que se le pueden dar a este radar así como mejoras para hacerlo más eficiente. Entre las muchas existentes destaco las siguientes.

5.4.1 Utilización del radar como material docente

Una vez diseñado y puesto en marcha, no es excesivamente complicado replicarlo. Repasando las partes del radar se necesitarían: un Arduino, dos antenas, circuito radiofrecuencia, material electrónica para construir el filtro/amplificador y una batería. Todo ello es fácil de adquirir y por un precio bastante más asequible que este.

Para facilitar la tarea a los alumnos se puede encargar a una empresa que construya un chip del circuito electrónico del filtro/ amplificador, de tal forma que únicamente sería necesario unir las piezas para tenerlo en funcionamiento. Por otro lado, habría que escribir unos códigos de procesado que estuviesen adaptados a los conocimientos de los alumnos ya que los códigos ya están hechos.

Una vez construido, sería un instrumento muy útil para las clases prácticas de la asignatura de “Sensores Navales” ya que además de tener la posibilidad de montar un radar, se podrá poner en práctica lo ya estudiado en la teoría. Además, es una buena forma de comprobar cuál es el papel de cada componente, entendiendo así mejor el funcionamiento de un radar.

5.4.2 Mejoras técnicas

Una vez construido este modelo, existen muchos aspectos técnicos mejorables. De todas las mejoras existentes, merece la pena destacar:

-Procesado coherente: Mediante el procesado coherente, podemos obtener el signo de la variación de la frecuencia Doppler (aumenta o disminuye la frecuencia transmitida) de tal forma que se pueda calcular si el blanco está en acercamiento o en alejamiento. Además abre la puerta a la aplicación de algoritmos de procesado más sofisticados que utilizan la información de fase de la señal.

-Amplificador de banda S: Una de las limitaciones de este radar es el alcance obtenido. Para mejorarlo, se puede amplificar la señal a la salida del divisor, de tal forma que la potencia de transmisión sea mayor.

5.4.3 Estudio de diferentes señales

Una de las principales ventajas de este radar, es que su generador de rampa es un elemento programable que puede generar la señal con la forma que deseemos, pudiendo estudiar las ventajas que aporta cada tipo de señal.

Por ejemplo, si bien la señal triangular es la más adecuada para realizar medición de distancia, la señal de dientes de sierra mejora la resolución en distancia. Por lo tanto, además de poder realizar los cálculos, se puede comprobar cuál es el alcance, resolución en distancia etc... para diferentes señales. Las señales en sí ya están generadas para el Arduino, solo haría falta modificar el código de procesamiento en el ordenador.

5.4.4 Mejora

Es una tarea que si bien es compleja, aportaría muchas ventajas. Para ello sería necesario procesar la señal de la salida del filtro (se podría hacer con el Arduino, ya existen códigos similares) y una pantalla en la que representar los datos obtenidos. La forma en la que se puede hacer es indicando a

partir de qué nivel de señal se quiere que se represente y mostrar los datos de distancia y velocidad según el tiempo.

Habría que centrarse en tres aspectos fundamentalmente: Hacerlo estanco, programarlo para que funcione de forma independiente del ordenador y alimentarlo. En el punto anterior explico una idea general de cómo pienso que es posible hacerlo independiente del ordenador. Para hacerlo estanco basta simplemente con construir una carcasa que se amolde a las dimensiones.

En cuanto para la alimentación, una posible mejora, es la utilización de una placa solar. Existen en el mercado una gran variedad de placas solares de 12 voltios a un precio muy económico. La idea es conectar esa placa solar a la batería de forma que se cargue durante las horas de sol.

5.4.5 Radar de onda pulsada

El radar de onda continua tiene algunas ventajas con respecto a los radares de onda pulsada pero tiene también serios inconvenientes (como puede ser una peor medición de la velocidad o una menor eficiencia al transmitir con este nivel de potencia). Sería aún así interesante configurar este mismo radar para que opere de forma pulsada. Para ello habría que hacer algunas modificaciones: En primer lugar, en el transmisor ya que habría que pulsar la señal de radiofrecuencia del oscilador y habría que utilizar un duplexor que separe la cadena transmisora de la receptora durante la transmisión del pulso. El resto del esquema podría mantenerse.

5.5 Conclusión personal

Desde el primer momento la mayor motivación para hacer este proyecto ha sido el de diseñar y construir un sistema como es un radar desde cero. Las expectativas que uno se marca conforme va diseñando el proyecto, impulsan a seguir trabajando para alcanzar las metas establecidas. Si bien la fase de diseño se puede considerar la más tediosa por la necesidad de búsqueda de información, es necesaria antes de iniciar la fase de construcción.

Uno de los aspectos más gratificantes de este proyecto es que, no solo se construye el sistema desde el inicio, sino que se hace con materiales comerciales que se utilizan para otras aplicaciones, encontrando un sentido práctico a todas estas piezas. La gran mayoría de los materiales utilizados para este proyecto son de fácil adquisición vía internet o en gran parte de las tiendas de electrónica, por lo que no supone ningún problema conseguirlos.

Por otro lado considero que si este proyecto tuviera un mayor margen de tiempo de desarrollo, sería mucho más preciso, consiguiéndose mejores resultados tanto en presentación, solución de problemas y funcionamiento. Aun así, este radar puede servir como punto de partida para muchas de las líneas futuras expuestas anteriormente de forma que sirva para futuros TFG.

Si bien es un proyecto que exige una entrega considerable, el balance total es absolutamente positivo, no solo por la satisfacción de ver cumplidas las expectativas iniciales, sino por los conocimientos adquiridos así como las capacidades para desenvolverse en un trabajo de estas características.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1] | M. d. Dueños, *Yo y la Energía (Biografía Nikola Tesla)*, Madrid: Turner, 2005.
- 2] | Varios, «An interactive radar demonstration for children,» Lincoln Laboratory, Massachussets, 2012.
- 3] | G. L. Chavart, *Small and short range radar systems book*, Massachussets: CRC, 2014.
- 4] | U.o.Texas, «www.ig.utexas.edu,»[Enlínea].Available: http://www.ig.utexas.edu/research/projects/mars/education/radar_works.htm. [Último acceso: 16 02 2015].
- 5] | -, «Whistler,»[Enlínea].Available: https://www.whistlergroup.com/media/wysiwyg/radar_bounce.jpg. [Último acceso: 19 02 2015].
- 6] | -, «www.info.scichina.com,»[Enlínea].Available: <http://info.scichina.com/sciFe/EN/abstract/abstract508076.shtml>. [Último acceso: 19 02 2015].
- 7] | RADARTUTORIAL, «www.radartutorial.eu,»[Enlínea].Available: [http://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20of%20Radar%20systems%20\(1\).en.html](http://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20of%20Radar%20systems%20(1).en.html). [Último acceso: 16 02 2015].
- 8] | J. M. N. Ortuño, «Apunte Radares de onda pulsada curso 2014-2015,» de *Sensores Navales*, Marín, 2015.
- 9] | «www.astarmathsandphysics.com,» [Enlínea]. Available: <http://astarmathsandphysics.com/ib-physics-notes/waves-and-oscillations/ib-physics-notes-the-doppler-effect.html>. [Último acceso: 18 02 2015].
- 10] | W. Wiesbeck, «Radar Systems Engineering,» de *Radar Systems Engineering*, Karlsruhe, IHE, 2009, p. 22.
- 11] | S. SIMA, «FMCW Radar Sensors,» de *FMCW Radar Sensors*, Kiste, Suecia, -, 2011, p. 44.
- 12] | -, «Viasat,»[Enlínea].Available: https://www.viasat.com/files/assets/24GHz_RADAR_chip_107_web.pdf. [Último acceso: 02 03 2015].
- 13] | I.Radar, «www.superrobotica.com,»[Enlínea].Available: <http://www.superrobotica.com/S320103.htm>. [Último acceso: 21 02 2015].
- 14] | Geektheory, «www.geektheory.com,» [En línea]. Available: <https://geekytheory.com/tutorial-arduino-radar-giratorio-con-lcd/>. [Último acceso: 13 02 2015].
- 15] | «Página de cursos de la MIT,» [En línea]. Available: http://web.mit.edu/professional/short-programs/courses/radar_systems.html. [Último acceso: 03 03 2015].
- 16] | G. L. Charvat, *Small and short Range Radar Systems*, Michigan: CRC, 2014.
- 17] | G.L. Charvat, Coffe can Radar Forum, <http://www.radar-can.com>. [Último acceso: 06 03 2015]
- 18] | sparkfun, «www.sparkfun.com,»[Enlínea].Available:

- <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>. [Último acceso: 19 02 2015].
- 19] M. circuits, «VCO ZX-95-2536C-S+,» [En línea]. Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX95-2536C+.pdf>. [Último acceso: 19 02 2015].
- 20] M.Circuits,«AmplifierZX60-272LN-S+,»[Enlínea].Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX60-272LN+.pdf>. [Último acceso: 19 02 2015].
- 21] S.Mini-circuits,«PlitterZX10-2-42-S+,» [En línea]. Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX10-2-42+.pdf>. [Último acceso: 18 02 2015].
- 22] TP-LINK,«TL-ANT2409A,»[Enlínea].Available:<http://www.tp-link.com/mx/products/details/?model=TL-ANT2409A>. [Último acceso: 16 02 2015].
- 23] M.Mini-Circuits,«MIXERZX05-43MH-S+,»[Enlínea].Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX05-43MH+.pdf>. [Último acceso: 25 02 2015].
- 24] LEOCH,«www.leoch.com,»[Enlínea].Available:<http://www.binary-power.com/specification/BLDJW12-7.0.pdf>. [Último acceso: 25 02 2015].
- 25] M. Circuits, «Mixer,» [En línea]. Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX05-43MH+.pdf>.
- 26] M. circuits, «Splitter,» [En línea]. Available: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX10-2-42+.pdf>.
- 27] -,«FilterWizard,»AnalogDevices,[Enlínea].Available: <http://www.analog.com/designtools/en/filterwizard/#/type>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 28] T.INSTRUMENT, «Webench.com,» Texas Instrument, [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lstds/ti/analog/webench/webench-filters.page>. [Último acceso: 22 02 2015].
- 29] -, «PSIM,» [En línea]. Available: <http://powersimtech.com/products/psim/>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 30] N.Torres,«www.monografias.com,»[Enlínea].Available: <http://www.monografias.com/trabajos70/filtros-activos/image005.jpg>. [Último acceso: 22 02 2015].
- 31] -, «SCHEMEIT,» DIGIKEY, [En línea]. Available: <http://www.digikey.com/schemeit>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 32] -, «Keysight,» [En línea]. Available: <http://www.keysight.com/en/pd-1944597-pn-DSOX2002A/oscilloscope-70-mhz-2-channels?&cc=ES&lc=eng>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 33] -, «Testequity,» [En línea]. Available: <http://www.testequity.com/products/4429/>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 34] -,«Element14Community,»[Enlínea].Available: <http://www.element14.com/community/docs/DOC-47030/l/user-manual-data-sheet-for-tenma-72-870072-8690-72-8690>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 35] -,«Keysight,»[Enlínea].Available:<http://www.keysight.com/en/pd-1000002152%3Aeps%3Apro-pn-8593E/portable-spectrum-analyzer-9-khz-to-22->

- ghz?cc=ES&lc=eng. [Último acceso: 03 03 2015].
- 36] -, «Sigview,» [En línea]. Available: <http://www.sigview.com/>. [Último acceso: 05 03 2015].
- 37] -, «Audacity,» [En línea]. Available: <http://audacity.sourceforge.net/?lang=es>. [Último acceso: 03 03 2015].
- 38] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- 39] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.
- 40] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.
- 41] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.
- 42] A. UNO, «arduino,» [En línea]. Available: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno>.
- 43] LEOCH, «Batería,» [En línea]. Available: <http://www.binary-power.com/specification/BLDJW12-7.0.pdf>.
- 44] Anonimo, «www.unimelb.edu,» [En línea]. Available: <http://www.commercial.unimelb.edu.au/microradar>. [Último acceso: 21 02 2015].
- 45] ARDUINO, «www.arduino.com,» [En línea]. Available: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 23 02 2015].
- 46] M. d. Dueños, Yo y la Energía (Biografía Nikola Tesla), Turner.

ANEXO I: CÓDIGO DEL ARDUINO

```

#include <Wire.h> // Incluye la librería Wire, necesaria para comunicarnos mediante I2C
#define PIN_PULSO_SYNC 13
#define MCP4725_ADDR 0x60

float Vmin, Vmax;
int imax, imin, salto;
void setup()
{
  Vmin = 2.00; // Vmin en voltios
  Vmax = 3.00; // Vmax en voltios
  salto = 4; // Tamaño del salto

  imin = int (((Vmin+0.1)/5)*4096);
  imax = int ((Vmax/5)*4096);

  pinMode(PIN_PULSO_SYNC, OUTPUT);
  Wire.begin();
  TWBR = 3;
  // Da valores a A2 y A3, estableciendolos como salidas para hacerlos Vcc y GND que
  alimentaran al DAC MCP4725

}

void loop()
{
  digitalWrite(PIN_PULSO_SYNC, HIGH); // Establece el pulso de sincronismo como "HIGH"
  for (int i = imin; i <= imax; i=i+salto) // Pendiente ascendente de la señal triangular
  {
    Wire.beginTransmission(MCP4725_ADDR);
    Wire.write(0b01000000); // cmd para actualizar el DAC
    Wire.write((i & 0xFF0) >> 4); // Los 8 bits más significativos...
    Wire.write((i & 0xF) << 4); // Los 4 bits menos significativos
    Wire.endTransmission();
  }

  digitalWrite(PIN_PULSO_SYNC, LOW); // Pulso de sincronismo en "LOW"

  for (int i = imax; i >= imin; i=i-salto) // Pendiente descendente de la señal triangular
  {
    Wire.beginTransmission(MCP4725_ADDR);
    Wire.write(0b01000000); // cmd para actualizar el DAC
    Wire.write((i & 0xFF0) >> 4); // los 8 bits más significativos
    Wire.write((i & 0xF) << 4); // los 4 bits menos significativos
    Wire.endTransmission();
  }
}

```