

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA**  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
**DEL PERÚ**

**SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS DE UN RADAR DE  
ONDA CONTINUA EN FRECUENCIA MODULADA MONTADO  
EN UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**DIEGO ALBERTO CABALLERO CARDENAS**

**ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina**

Lima, Mayo del 2017

## DEDICATORIA



*A mi madre que siempre confía en mí y me da fuerzas para seguir adelante a pesar de tener problemas de salud, me enseña la fortaleza y el amor que una madre puede tener por su hijo, muchas gracias.*

*A mi padre que es el motor de la casa, que con su profesionalismo me motiva a cada día ser una mejor persona.*

*A mi hermana que es la alegría de la casa, y siempre arrancarme una sonrisa en los momentos más tristes.*

*A mi familia que sinceramente es lo más valioso que toda persona pueda tener.*

## AGRADECIMIENTOS

A mis amigos Estefany, Hansell, Raúl, Rubén, Daniel, José por estar siempre dándome una mano en esta difícil tarea que fue el proyecto de tesis.

Al Ing. Carlos Saito y su equipo de investigación de vehículos aéreos no tripulados por la ayuda brindada en las pruebas de vuelo.

Al Dr. Manuel Yarlequé por su constante apoyo y tolerancia en el proyecto de tesis, gracias por enseñarme que no hay excusas cuando uno se propone en cumplir un objetivo.



## RESUMEN

El trabajo desarrollado en la presente tesis consiste en diseñar un sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada y montarlo en un UAV (vehículo aéreo no tripulado), con la finalidad de simular un radar de apertura sintética. En el capítulo 1 nos enfocaremos en introducir los sistemas de radar de apertura sintética, analizaremos su importancia, ventajas, desventajas y limitaciones que existen hoy en día.

En el capítulo 2 nos enfocaremos en el radar utilizado describiendo el diseño implementado, su funcionamiento y las etapas que integra todo el proyecto, haciendo hincapié en el sistema de adquisición de datos y almacenamiento.

En el capítulo 3 se explica el desarrollo del proyecto del sistema de radar de onda continua en frecuencia modulada, se añade el sistema de adquisición de datos y almacenamiento. Finalmente se detalla el proceso de montaje en el vehículo aéreo no tripulado con la finalidad de adquirir los datos en vuelo.

En el capítulo 4 se muestran las pruebas y los resultados obtenidos del sistema de adquisición de datos tanto en tierra como en aire. Las pruebas en tierra servirán para validar que el sistema de adquisición funciona correctamente, ya que se tiene un procesamiento para el radar estático donde se mide la distancia que recorre un objeto en movimiento. Las pruebas en vuelo nos servirán para validar que el chasis elaborado fue capaz de ser montado en el UAV con la mayor estabilidad posible.

Finalmente se plantean las conclusiones y opciones de mejora de la presente tesis.

### TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada montado en un vehículo aéreo no tripulado.  
Área : Circuitos y Sistemas # 1307  
Asesor : Manuel Yarlequè  
Alumno : Diego Caballero Cardenas  
Código : 20097050  
Fecha : 25/08/2015



#### Descripción y Objetivos

Hoy en día , los sistemas de radar de apertura sintética instalados en vehículos aéreos no tripulados están siendo utilizados para la generación de imágenes de diferentes tipos de terreno. Estos sistemas están compuestos de una unidad de radar y de una plataforma en movimiento que hace posible el efecto de apertura sintética.

En los sistemas de radar de apertura sintética, la unidad de radar tiene la función de transmitir y recibir señales de radiofrecuencia para obtener parámetros básicos de rango y velocidad necesarios para la generación de imagen. Esta unidad de radar debe cumplir con diferentes parámetros de diseño, definidos por las características de la aeronave no tripulada, tales como peso y tamaño. Por esta razón se están empleando radares de onda continua en frecuencia modulada, debido a su bajo consumo de energía comparado con otras unidades como el radar de pulsos.

La presente tesis busca diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada en un vehículo aéreo no tripulado, fundamentalmente se requiere que el radar tenga unas buenas características en cuanto a resolución, sensibilidad, margen dinámico, alcance y funcionalidad. Por otro lado, se busca reducir el tamaño, volumen, peso y consumo del sensor.

*Manuel Yarlequè*

*Diego Caballero Cardenas*

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

*Miguel Ángel Cataño Sánchez*  
M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATAÑO SÁNCHEZ  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁI

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

Título : Sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada montado en un Vehículo Aéreo no Tripulado

**Índice**

Introducción

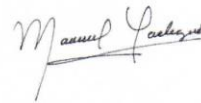
1. Problemática
2. Fundamento Teórico
3. Diseño e Implementación del sistema
4. Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



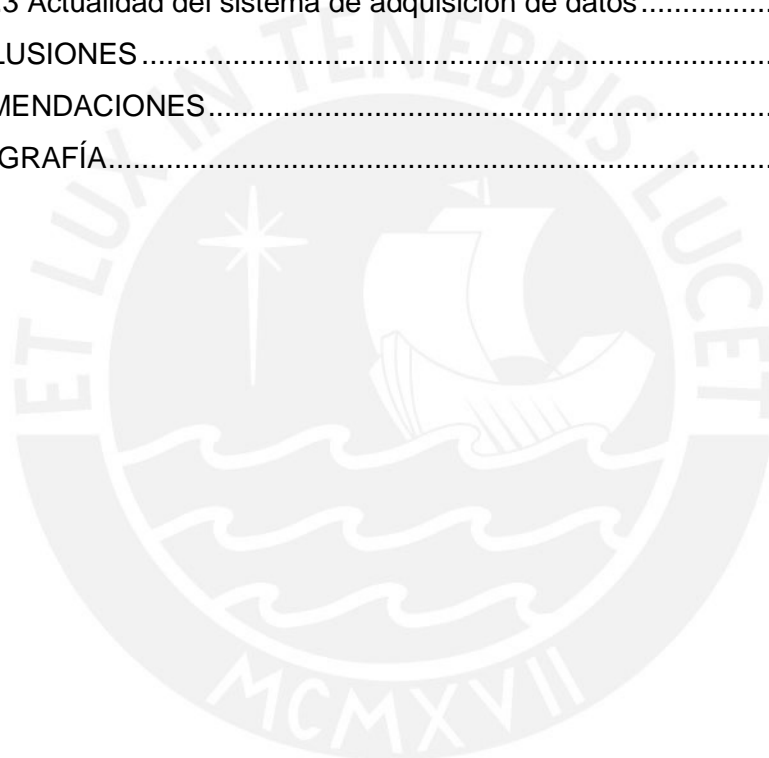
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

  
M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATANO SÁNCHEZ  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS



3.3.1 Elección de baterías .....	37
3.3.2 Elección de los reguladores de voltaje .....	37
3.4 Elección del Vehículo Aéreo no tripulado .....	38
3.5 Diseño del chasis del sistema radar .....	39
4.  CAPÍTULO 4: Pruebas y resultados .....	41
4.1 Pruebas en tierra .....	41
4.1.1 Pruebas en tierra de distancia en campo abierto .....	42
4.1.2 Pruebas en tierra de distancia en espacios cerrados .....	43
4.2 Pruebas en vuelo .....	44
4.2.1 Pruebas en vuelo, escenario: huaca de la PUCP .....	44
4.3 Actualidad del sistema de adquisición de datos .....	46
CONCLUSIONES .....	49
RECOMENDACIONES .....	50
BIBLIOGRAFÍA .....	51





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sistema de Teledetección SAR.....	3
Figura 1.2: Modelo geometría del SAR .....	4
Figura 1.3: Esquema de la forma de onda de un radar de onda continua .....	6
Figura 1.4: Comparación de una imagen SAR y una imagen con un dispositivo óptico (DIA).....	7
Figura 1.5: Comparación de una imagen SAR y una imagen con un dispositivo óptico (NOCHE).....	7
Figura 2.1: Modulación lineal diente de sierra.....	9
Figura 2.2: Modulación lineal triangular .....	9
Figura 2.3: Diagrama de bloques de un radar FMCW .....	10
Figura 2.4: Configuración homodina de un radar FMCW .....	10
Figura 2.5: Respuesta Frecuencial <i>Sbf</i> .....	12
Figura 2.6: Respuesta del radar CW-FM a un blanco estático. En negro se representa la señal emitida. En rojo y azul se representan las respuestas recibidas de dos blancos diferentes .....	13
Figura 2.7: Respuesta del radar CW-FM a un blanco en movimiento .....	14
Figura 2.8: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos .....	15
Figura 2.9: Proceso de digitalización. ....	15
Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de radar CW-FM.....	18
Figura 3.2: Filtro Activo de 1er Orden .....	20
Figura 3.3: Filtro Butterworth de 4to orden topología Sallen-Key .....	21
Figura 3.4: Generador de señales .....	22
Figura 3.5: Señal de sincronismo y señal moduladora .....	22
Figura 3.6: Diagrama de bloques sistema de adquisición del radar CW-FM .....	23
Figura 3.7: Microcontrolador PCM1807 .....	24
Figura 3.8: Arduino Mega .....	25
Figura 3.9: Raspberry PI2.....	26
Figura 3.10: Cirrus Audio Logic Card .....	28
Figura 3.11: Sistema de adquisición de datos.....	29
Figura 3.12: Sistema de adquisición de datos.....	29
Figura 3.13: Diagrama de flujo del sistema de adquisición de datos basado en Raspberry PI2 y Cirrus audio logic card.....	30
Figura 3.14: Monitor LCD para la configuración.....	31
Figura 3.15: Teclado, mouse y Raspberry pi2 para la configuración.....	32
Figura 3.16: Validación de comunicación entre RPI2 y Cirrus audio logic card .....	33
Figura 3.17: Programa Ejecutable para la grabación y almacenamiento de datos .....	35

Figura 3.18: Diagrama de bloques de la fuente de alimentación del sistema .....	36
Figura 3.19: Consumo potencia del sistema de adquisición de datos .....	36
Figura 3.20: Consumo potencia del radar .....	37
Figura 3.21: REDUCTOR DC-DC LM2596 .....	38
Figura 3.22: Diseño de la fuente de alimentación. ....	38
Figura 3.23: HEXACOPTERO S800 .....	39
Figura 3.24: Diseño del chasis del radar CW-FM.....	39
Figura 3.26: Diseño del chasis del radar CW-FM montado la base del UAV .....	40
Figura 3.27: Radar CW-FM montado en un UAV .....	41
Figura 4.1: Medición del Radar CW-FM estático en la cancha de futbol PUCP. ....	42
Figura 4.2: Medición del Radar CW-FM estático en el 3er piso pabellón V.....	42
Figura 4.3: Medición del Radar CW-FM estático en el 3er piso pabellón V .....	44
Figura 4.4: Huaca PUCP, foto tomada desde un UAV .....	45
Figura 4.5: UAV con el sistema radar listo para hacer el barrio de la zona .....	45
Figura 4.6: UAV con el sistema radar realizando el barrido. ....	46
Figura 4.7: Sistema SAR de carril.....	46
Figura 4.8: Imagen SAR de la cancha deportiva y parte del sendero inca detrás (izquierda) y una fotografía de escena objetivo (derecha).....	47
Figura 4.9: Fondo medido para los datos de procesamiento y la formación final de imagen.....	48
Figura 4.10: Imagen SAR medida del dicroico a 21 m del radar .....	48
Figura 4.11: Imagen final de un dicroico utilizando el algoritmo de migración de rango (RMA) .....	48

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparaciones de tecnologías de ADC.....	16
Tabla 3.1 Parámetros del sistema de radar CW-FM .....	17
Tabla 3.2 Características del sistema de radar CW-FM.....	18
Tabla 3.3 Tabla de Componentes de la Unidad de Radar.....	18
Tabla 3.4 Tabla de características ADC Stereo PCM 1807.....	25
Tabla 3.5 Tabla de características de la RPI2.....	26



## INTRODUCCIÓN

La constante necesidad del ser humano por obtener información detallada acerca de objetos y/o superficies desconocidas o en constante evolución ha provocado, junto a los grandes avances tecnológicos de la última década, el desarrollo de técnicas de adquisición de información. Dentro de este amplio marco se encuentran las técnicas de teledetección, que permiten obtener información a distancia o velocidad sin que exista un contacto material a través de la radiación emitida (teledetección pasiva) o reflejada (teledetección activa) por el objetivo a medir [1].

A lo mencionado anteriormente se suma el gran avance de los UAV para distintas aplicaciones como la monitorización y adquisición de imágenes. Estas aplicaciones se pueden lograr mediante cámaras de alta resolución o sensores ópticos. Aunque la correcta adquisición mediante estos medios depende de muchos factores como por ejemplo el clima, condiciones ambientales, etc. Por otra parte, el sistema de teledetección SAR (Synthetic Aperture Radar) viene siendo uno de los más utilizados debido a su bajo costo, ligereza, ahorro en potencia y no depende en gran magnitud de los factores ambientales.

El presente trabajo de tesis se centra en el diseño e implementación de un sistema adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada, la elaboración del chasis que contenga el radar mencionado cuyas características deben ser bajo peso y capaz de ser montado en un UAV con la finalidad de simular un prototipo de radar SAR.

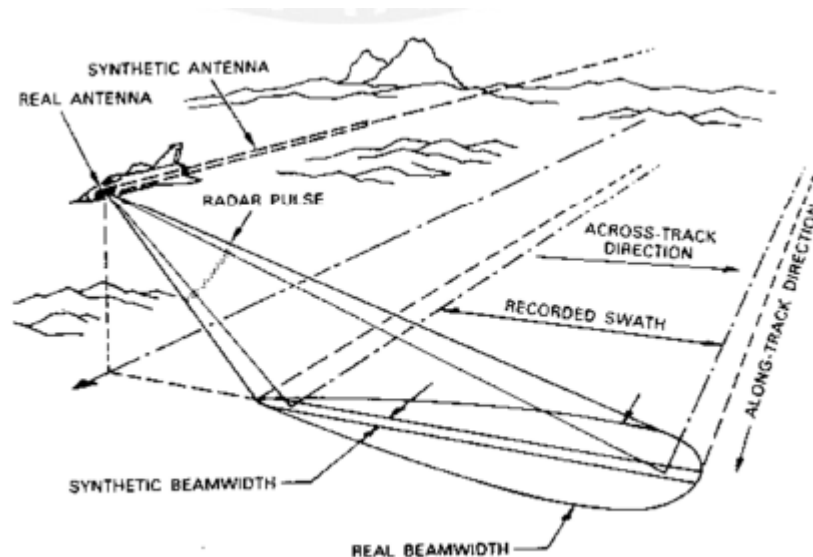
## 1. CAPÍTULO 1: Problemática

En este capítulo se tiene como objetivo contextualizar los sistemas de Radar de Apertura Sintética, se describirá su funcionamiento y aplicaciones de dicha tecnología. Finalmente se analizará las ventajas y desventajas de estos sistemas de radar.

### 1.1 Sistemas de Radar de Apertura Sintética

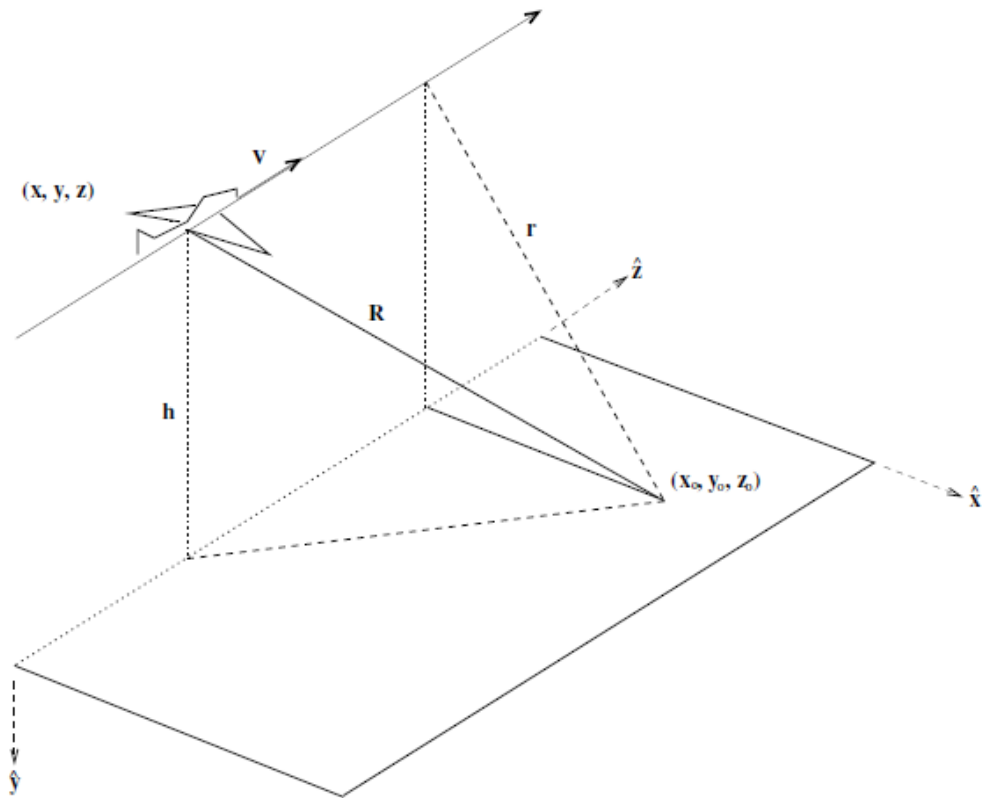
Se define radar como un sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas emitidas por una antena transmisora y mediante una antena receptora recibir las ondas electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar la localización o velocidad de este. En la práctica, un sistema radar puede ser capaz de medir dirección, altura, distancia, rumbo y/o velocidad a partir del eco reflejado por objetos tanto estáticos como móviles [2].

Un sistema SAR está compuesto por una unidad de radar y una plataforma de movimiento (UAV), es decir que una unidad de radar, montada en un UAV, operando a lo largo de una trayectoria recta de la nave, irá emitiendo ondas electromagnéticas y midiendo los ecos de las mismas en la recepción, a partir de esto se obtiene información importante (parámetros) acerca del objeto irradiado a cada instante (ver Figura 1.1). La importancia de la plataforma de movimiento está en el hecho de que a lo largo de su trayectoria, el radar puede barrer o iluminar un área de terreno tan grande como la que se obtendría si se utilizara una antena de gran tamaño (algunos kilómetros de longitud), no obstante se utiliza una antena pequeña (inferiores a 1 metro). De esta manera se puede decir que se ha sintetizado un área mucho mayor utilizando una antena pequeña, y esto se logra sumando las contribuciones (emisiones y recepciones) que recibe el radar en cada instante de tiempo que opera a lo largo de la trayectoria del UAV. Cabe mencionar que, en la figura 1.1, *recorded swath* se refiere a la franja del terreno que el radar irradia a lo largo de su trayectoria [10].



**Figura 1.1: Sistema de Teledetección SAR [5]**

En los sistemas de radar convencionales, la resolución de la imagen dependía del tamaño del área iluminada o irradiada sobre la tierra de una sola vez, por esta razón en este tipo de sistemas era importante contar con una antena muy grande y que a la vez cuente con una amplia apertura para poder irradiar la mayor cantidad de terreno. Sin embargo, usando técnicas SAR se alcanzaron resoluciones mucho más finas utilizando, en comparación, antenas más pequeñas. En la figura 1.2 se muestra el modelo geométrico de SAR, donde los ejes ( $x^{\wedge}$ ,  $y^{\wedge}$ ,  $z^{\wedge}$ ) se refieren a las direcciones de rango, elevación y acimut respectivamente. La plataforma SAR localizada en las coordenadas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) vuela a lo largo de una trayectoria recta en  $z^{\wedge}$  (acimut) para una altura constante  $h$ , y una velocidad  $v$ . La distancia desde la plataforma hasta el objetivo, es conocida como rango de inclinación y se denota por  $R$ . Con el uso de un haz de radiación a través de una antena real y pequeña, el radar emite señales por un lado de la trayectoria de vuelo por lo que las señales de retorno son recibidas y luego procesadas. Las contribuciones, a cada instante de tiempo y a lo largo de la trayectoria, de las características del objetivo son representados como segmentos, los mismos que son combinados, para finalmente crear la apertura sintética que sería mucho más grande que la apertura real de la antena[6].



**Figura 1.2: Modelo geometría del SAR [6]**

Aplicaciones de Sistemas SAR:

- Monitoreo de desastres naturales.
- Monitoreo de terrenos agrícolas.
- Intervención en ambientes de alta toxicidad.
- Seguimiento y evaluación de zonificaciones urbanas.
- Cartografía de áreas forestales, reservas naturales y sitios arqueológicos.

## 1.2 Sistemas de Teledetección a bordo

Ahora bien, ya que el creciente desarrollo de los UAV, ha hecho posible su uso para transportar sensores de teledetección (como sistemas SAR), entre alguna de sus características se presentan los siguientes [2]:

- Alturas de vuelo de algunos metros a decenas de kilómetros.
- Sistema flexible.
- Bajo costo de desarrollo.

- Bajo costo de explotación.
- Dimensiones reducidas para transportar instrumentos.

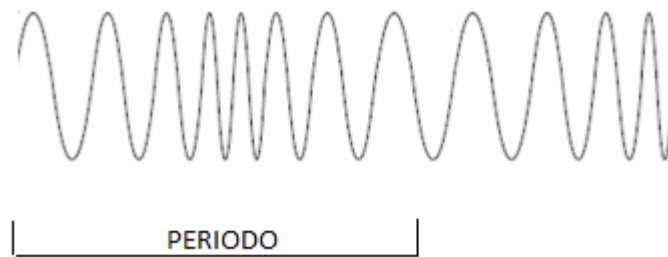
La palabra radar proviene de la abreviatura de (Radio Detection And Ranging), estos sistemas de radar utilizan antenas directivas y formas de onda moduladas para transmitir energía electromagnética de un volumen específico con el propósito de buscar objetivos. Por tanto, los objetivos que queden dentro del área de búsqueda del radar, reflejarán como eco, parte de ésta energía retorna de nuevo hacia el radar. Luego, estos ecos son procesados por el receptor del radar para extraer información del objetivo, tales como: rango, velocidad, posición angular y otros parámetros de identificación de objetivos [6].

En ese sentido, la clasificación de los radares puede ser variada, ya que existen radares cuya operación está basada en el suelo, aire, vehículos espaciales o barcos. También se pueden clasificar en características específicas del radar, tales como la banda de frecuencia, el tipo de antena y la forma de onda utilizadas. Otra clasificación se refiere a la misión y/o funcionalidad del radar, esto incluye: el tiempo (clima), adquisición y búsqueda, seguimiento, control de incendios, alerta temprana, y los radares de evitación de colisiones [10].

Sin embargo, los radares más a menudo se clasifican por el tipo de forma de onda que utilizan. En este aspecto, los más comunes son los radares de onda continua (CW) y los radares de Pulso (PR), para el presente proyecto de tesis se tiene como base el radar de onda continua.

Los radares de onda continua (CW) son aquellos que están transmitiendo y recibiendo continuamente y de manera simultánea señales electromagnéticas (ver Figura 1.3), además usan antenas separadas para transmitir y recibir las señales. El radar de onda continua en frecuencia no modulada puede medir con precisión las velocidades del objetivo (utilizando el efecto Doppler), sin embargo la información de rango (distancia) del objetivo no puede ser extraída sin la utilización de alguna forma de modulación. Por tanto, el uso principal del radar de onda continua en frecuencia no modulada se encuentra en la búsqueda y seguimiento de la velocidad de objetivos, y en la orientación de misiles. El radar de CW también tiene la ventaja de consumir menos energía que un radar de pulsos. Esto es porque transmite pulsos de mucha mayor duración. La longitud de pulsos largos aprovechan mejor la energía que la contenida en un único pulso; por lo tanto, el radar de CW trasmite con menos potencia para mantener la misma SNR.





**Figura 1.3: Esquema de la forma de onda de un radar de onda continua.**  
**[Fuente: Elaboración propia]**

Los radares LFM-CW (onda continua en frecuencia modulada), pueden variar su frecuencia de trabajo durante la medida, es decir, la señal transmitida por este tipo de radar se encuentra modulada en frecuencia. Dicha modulación frecuencial proporciona la capacidad para medir distancias ya que la modulación proporciona una referencia temporal [2].

Las ventajas del radar LFM-CW se dan para aplicaciones de corto alcance pero es necesario modificar el algoritmo de procesamiento para adaptarlo a este tipo de radar SAR [10].

Se tiene como base el radar LFM-CW debido a que el radar que se construirá debe operar con un bajo consumo de energía y los costos de los requerimientos tienen que ser factibles en un UAV. Además, un radar de LFM-CW también simplifica el hardware de muestreo, reduce los costos generales y el tamaño del sistema [6].

Una vez determinado el tipo de radar a usar, nace la necesidad de tener un sistema de adquisición de datos eficiente que pueda almacenar los valores recibidos por la antena receptora.

### **1.3 Beneficios y limitaciones de los sistemas de radar SAR**

La razón principal de utilizar SAR es que la calidad de la imagen no depende del tiempo o de las condiciones de la luz y las imágenes se pueden tomar en cualquier parte del día y en cualquier tiempo. Un dispositivo de imagen óptica (por ejemplo una cámara) no se puede utilizar para la imagen aérea de la superficie de la tierra durante la noche o cuando hay niebla o nubes. Por lo tanto, los radares de apertura sintética tienen una ventaja sobre dispositivos de imagen óptica [14].

A continuación se muestra dos imágenes de un aeropuerto, la imagen de la izquierda es una tomada con un sistema SAR y la imagen derecha tomada con un sistema óptico.



**Figura 1.4: Comparación de una imagen SAR y una imagen con un dispositivo óptico (DIA) [14]**



**Figura 1.5: Comparación de una imagen SAR y una imagen con un dispositivo óptico (NOCHE) [14]**

Para poder obtener estos resultados es necesario un correcto sistema de radar, en este caso un radar de onda continua en frecuencia modulada, un UAV que sea capaz de realizar el barrido lo más recto posible y tenga estabilidad en el aire. Sin embargo, los UAVs presentan algunas características que limitan su empleo para aplicaciones de teledetección. Por ejemplo, los UAVs suelen tener dimensiones reducidas para la integración con el sistema de radar [1], un objetivo de la presente tesis es realizar un chasis que pueda cumplir con la carga útil del UAV a utilizar.

Una etapa importante en un sistema SAR es la adquisición de datos, ya que es la etapa en que se recibe la datos para posteriormente poder procesarla y obtener los resultados aproximados a los de la figura 1.4

El objetivo de la presente tesis es realizar un sistema de adquisición de datos eficiente, que almacene los datos del radar de onda continua en frecuencia modulada. Además construir un chasis que cumpla con los requerimientos del UAV para finalmente simular un sistema SAR.

#### **1.4 Objetivos**

El propósito de esta tesis es implementar un sistema de adquisición de datos con la tecnología adecuada para cumplir los requerimientos de portabilidad y autonomía de RADAR de onda continua en frecuencia modulada montado en un UAV implica. Se enfatizará en la portabilidad del sistema en conjunto para poder ser montado en un UAV.

Objetivo General:

El objetivo general de este proyecto de tesis es implementar sistema de adquisición de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada y montarlo en un UAV.

Objetivos Específicos:

- Desarrollar la teoría de radares, puntualmente en el radar de onda continua en frecuencia modulada.
- Diseñar e implementar el Sistema de adquisición del Radar LFM-CW.
- Elaborar el chasis del Radar LFM para poder montarlo en un UAV.
- Simular un sistema de teledetección SAR.

## 2. CAPITULO 2: Fundamento Teórico

Este capítulo describe teóricamente el diseño del radar de onda continua en frecuencia modulada, con foco en el sistema de adquisición de datos y almacenamiento.

### 2.1 Radar de Onda Continua en Frecuencia Modulada

Un sistema radar de Onda Continua en Frecuencia Modulada se singulariza por modular la frecuencia transmitida. El proceso de las señales de eco de los radares FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) se simplifica notablemente cuando la modulación de frecuencia es lineal (también denominada 'chirp' por analogía acústica con el canto de los pájaros) [4].

Existen dos tipos de modulaciones lineales que se usan en estos tipos de radares: la modulación en diente de sierra (ver Figura 2.1) y la modulación triangular (ver Figura 2.2).

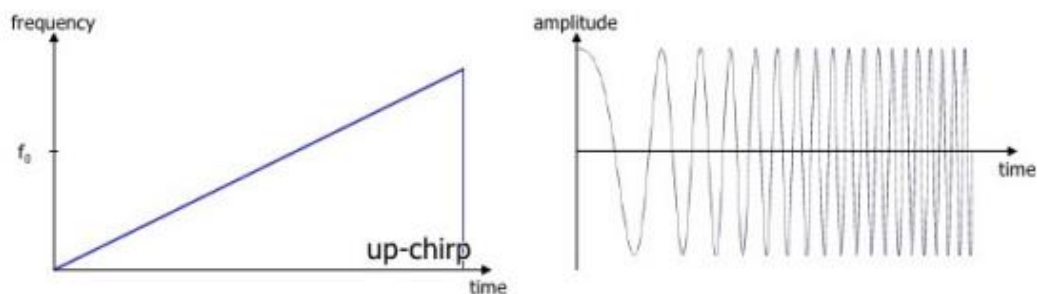


Figura 2.1: Modulación lineal diente de sierra [4]

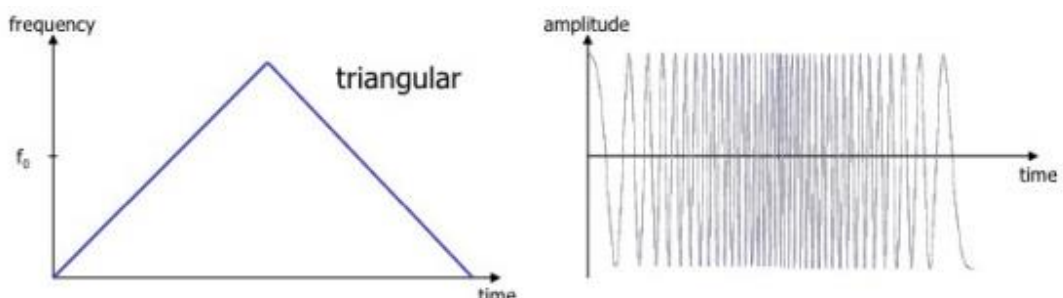


Figura 2.2: Modulación lineal triangular [4]

El esquema de modulación triangular es el más usado en los radares FMCW. Usando una modulación triangular, es posible obtener ambos parámetros de distancia y velocidad.

Los radares de onda continua en frecuencia modulada se dividen en cuatro etapas importantes para poder alcanzar su función, (ver figura 2.3). La primera se encarga de generar el chirp o señal modulada en frecuencia, la técnica más común de modulación para este sistema es la modulación lineal de frecuencia (LFM) a esta etapa la llamaremos unidad de control. La segunda etapa llamada RF front end permite transmitir y recibir las señales de alta frecuencia del radar [10] esta etapa se denomina unidad de radar. La tercera etapa es la adquisición de la señal de banda base para lo cual se utiliza un conversor analógico digital. Y finalmente la cuarta etapa es el almacenamiento de la señal recolectada por el radar, estas dos últimas etapas son el tema principal del presente proyecto de tesis, en la figura 2.4 se ilustra la configuración homodina de un radar.

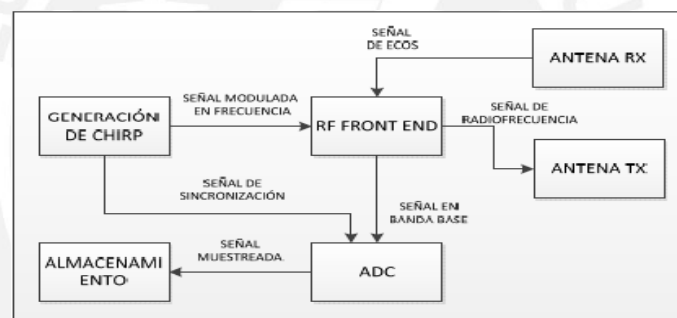


Figura 2.3: Diagrama de bloques de un radar FMCW [10]

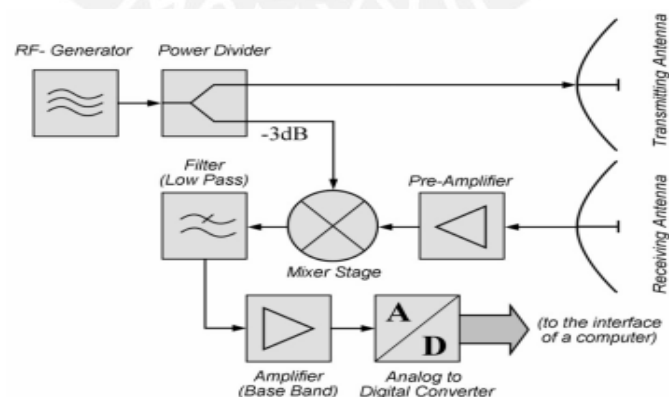


Figura 2.4: Configuración homodina de un radar FMCW [4]

## 2.2 Funcionamiento radar de onda continua en frecuencia modulada

En los radares LFM-CW los blancos son iluminados por la señal chirp implementada. Como se comentó en el presente diseño la señal chirp generada se trata de una señal triangular  $S_e(t)$  de período  $\tau$  (ecuación 2.1) ,  $f_0$  viene a ser la frecuencia a la que trabaja el radar en este caso 2.4 GHz . Al ser una modulación lineal, la frecuencia instantánea  $f_i$  se incrementa constantemente a lo largo del tiempo según su pendiente K (ecuación 2.2). Con tal de simplificar las expresiones, se hace uso de la notación equivalente paso bajo de las señales (ecuación 2.3) [2].

$$S_e(t) = A_e \text{Re}\{e^{j\phi}\} \quad (2.1)$$

$$f_i = \frac{\delta\phi}{\delta t} = 2\pi (f_0 + kt) \quad (1.2)$$

$$\hat{S}_e(t) = A_e \text{Re}\{e^{j\phi_0 + \omega_0 t + kt^2}\} \quad (2.3)$$

Una vez emitida la señal chirp, los blancos estáticos iluminados retornan una parte de la energía emitida. Así pues, la señal captada por el receptor consiste en una reproducción de la señal chirp triangular emitida ( $\hat{S}_r(t)$ ) (ecuación 2.4) con un pequeño retardo temporal determinado por la ecuación 2.5, siendo R la distancia al objetivo y c la velocidad de la luz [4].

$$\hat{S}_r(t) = \hat{S}_e(t-T) = A_r e^{j\phi_0 + K_c(t-T)^2} e^{-j\omega_0 T} \prod\left(\frac{t-T}{\tau}\right) \quad (2.4)$$

$$T = \frac{2R}{c} \quad (2.5)$$

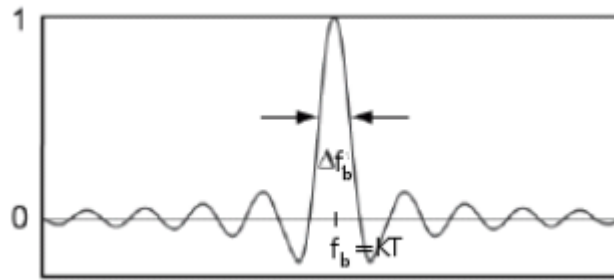
El objetivo final es obtener información sobre la distancia al objeto, por ello  $\hat{S}_r(t)$  y  $\hat{S}_e(t)$  son batidas por el mezclador (ver figura 2.4). La salida de este es filtrada con tal de seleccionar la señal  $\hat{S}_b(t)$ , consecuencia de la diferencia frecuencial de ambas en ecuación 2.6 .La información referente a la diferencia de frecuencia se encuentra en el término  $2\pi K T t$  [4].

$$\hat{S}_b(t) = A_r e^{j\pi K_c T^2} e^{-j\omega_0 T} e^{j2\pi K_c t T} \Pi\left(\frac{t-T}{\tau}\right) \quad (2.6)$$

Con tal de observar más claramente el comportamiento frecuencial descrito, resulta útil pasar al dominio frecuencial mediante la transformada de Fourier (ecuación 2.7) [2].

$$\hat{S}_b(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \hat{S}_b(f) = A_r e^{j\pi K_c T^2} e^{-j\omega_0 T} ((\tau_c - 2T) \text{sinc}[(f - K_c T)(\tau_c - 2T)]) \quad (2.7)$$

Si se representa la respuesta, se aprecian dos parámetros relevantes del funcionamiento del radar: el primero corresponde al tono centrado en la frecuencia de batido  $f_b$  mientras que el segundo responde al ancho espectral  $\Delta f_b$  de la sinc (ver Figura 2.5) [4].



**Figura 2.5: Respuesta Frecuencial  $\hat{S}_b(f)$  [4]**

El primer parámetro consiste en el tono  $f_b$  que permite extraer la información acerca la distancia del objetivo (ecuación 2.8).

$$f_b = TK \frac{2\Delta f}{\tau} T \quad (2.8)$$

Siendo  $\Delta f$  el barrido frecuencial o ancho de banda de la señal chirp. De esta forma se puede caracterizar cada uno de los diferentes blancos aparecidos en el radar siempre y cuando la distancia bajo observación no supere el umbral de donde el retraso producido por un objeto a distancia mayor alinearía el eco con el siguiente período de la señal chirp (ecuación 2.9), confundándose con otro objeto a distancia  $R_o - R_{max}$ [4].

$$R_{max} = \frac{2\tau}{c} \quad (2.9)$$

El segundo parámetro relevante es el ancho espectral que se observa entorno a  $f_b$ . Idealmente es preferible un tono puro por cada blanco, pudiendo distinguir entre blancos muy próximos. Sin embargo, por cada blanco se debe trabajar con una sinc de un ancho de banda determinado  $\Delta f_b$  (ecuación 2.10). Esto hace que blancos muy próximos de niveles de potencia similar queden solapados. El  $\Delta f_b$  determina la resolución en frecuencia que hay entre dichos blancos, aunque también resulta útil poder definir un parámetro equivalente en distancia. Así pues, este parámetro  $\Delta R$  permite definir la resolución espacial mínima para distinguir blancos de igual magnitud en potencia (ecuación 2.11) [4].

$$\Delta f_b = \frac{1}{\tau - 2T} \quad (2.10)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta f_b c \tau}{2\delta f} = \frac{1}{\tau - 2T} \frac{c \tau}{2\delta f} \stackrel{2T \ll c\tau}{\approx} \frac{c}{2\Delta f} \quad (2.11)$$

La explicación grafica se aprecia en la Figura 2.6.

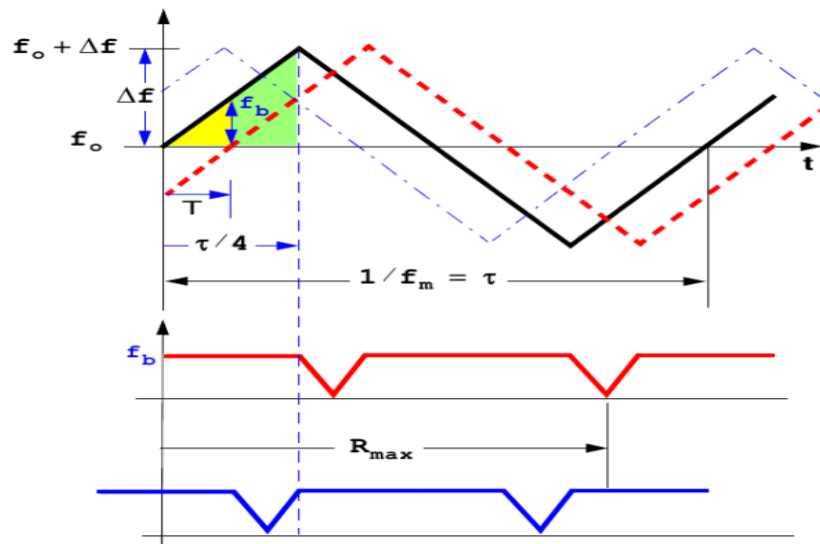


Figura 2.6: Respuesta del radar CW-FM a un blanco estático. En negro se representa la señal emitida. En rojo y azul se representan las respuestas recibidas de dos blancos diferentes [4].



El otro punto de interés en este tipo de radares es su capacidad para resolver en movimiento. En este caso y debido al efecto Doppler, la réplica recibida del blanco presenta un determinado incremento frecuencial en función de la velocidad radial a la que se desplace ( $f_d$ ). Esta diferencia respecto a la réplica del blanco estático, produce que la frecuencia de batido resultante del mezclador sea superior o inferior respecto  $f_b$ .

A partir de las ecuaciones (2.12) y (2.13) se puede determinar tanto la distancia al blanco.

$$f_b^+ = f_b - f_d \quad (2.12)$$

$$f_b^- = f_b + f_d \quad (2.13)$$

En la ecuación 2.14 se determina la distancia al blanco.

$$R = \frac{c\tau}{4\Delta f} \cdot \frac{f_b^+ + f_b^-}{2} \quad (2.14)$$

Como la velocidad del mismo en las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$f_d = \frac{f_b^- - f_b^+}{2} = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.15)$$

$$\Rightarrow v = \lambda \frac{f_b^- - f_b^+}{4} \quad (2.16)$$

En la Figura 2.7 se puede apreciar gráficamente la respuesta del radar a un blanco en movimiento.

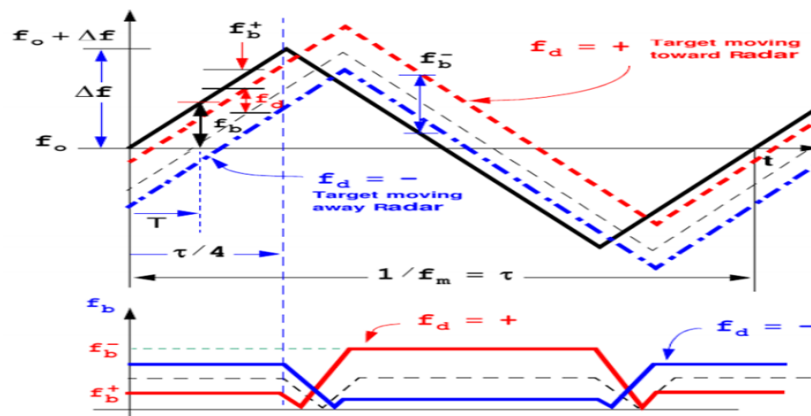


Figura 2.7: Respuesta del radar CW-FM a un blanco en movimiento [4].

### 2.3 Sistema de adquisición de datos

La captura de datos del radar LFM-CW se realiza mediante una unidad digitalizadora A/D (ver Figura 2.8). La unidad está encargada de adquirir de forma periódica cada  $T_s$  segundos (frecuencia de muestreo  $f_s$ ) el número de muestras que capturan un periodo de la señal triangular chirp (trama). La secuencia de datos digitalizados representa el nivel de voltaje capturado por ésta.

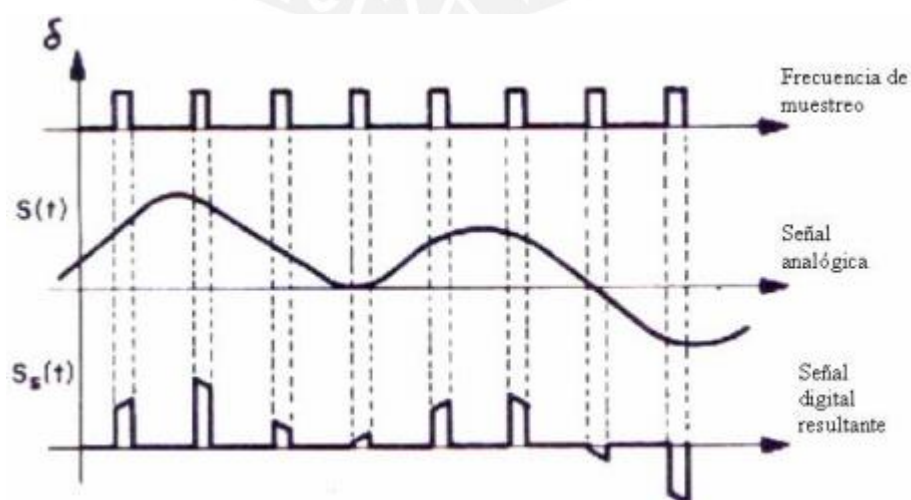


**Figura 2.8: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos [Fuente: Elaboración propia].**

En el proceso de convertir analógico-digital existen 3 conceptos que se tiene en cuenta:

- Muestreo, se van tomando valores discretos de la amplitud de un onda sonora a intervalos de tiempo pequeños.
- Frecuencia de muestreo, depende de la frecuencia de la señal o sonido.
- Resolución, Calidad del muestreo, más escalones para cuantificar.

En la Figura 2.9 se detalla el proceso de digitalización.



**Figura 2.9: Proceso de digitalización [Fuente: Elaboración propia].**

### 2.3.1 Tecnologías de convertidores analógicos digitales

Existen 3 tecnologías de ADC la comparación se realizará en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Comparaciones de tecnologías de ADC [Fuente: Elaboración propia]**

Características	ADC DELTA SIGMA	ADC SAR Aproximaciones Sucesivas	PIPELINE
<b>Fconversion</b>	≤ 4ksps ≤ 4Msps ≤ 10Msps	≤ 4Msps ≤ 1.25Msps	≤ 200Msps ≤ 250Msps ≤ 550Msps
<b>Resolución</b>	≤ 24-bit ≤ 16-bit	≤ 16-bit ≤ 18-bit	≤ 16-bit ≤ 14-bit ≤ 12-bit
<b>Comentario</b>	Costo moderado.	Operación simple, bajo consumo	Rápido y costo elevado.
<b>Latency</b>	Regular	Baja	Baja
<b>Consumo de potencia</b>	Constante	Depende la frecuencia de muestreo o constante	Depende la frecuencia de muestreo
<b>Aplicación</b>	AUDIO	Microcontroladores	Radar , Adquisición de datos, Imágenes Medicas

Conclusiones de las tecnologías:

- Delta - sigma : permite buen compromiso entre resolución , velocidad y potencia de consumo
- SAR : son por lo general la opción de baja potencia
- ADCs Pipeline : alta performance

En la presente tesis se trabajará con un ADC Delta.-Sigma, debido a que son más comerciales que los ADC Pipeline y tienen un buen balance entre resolución, velocidad y consumo de potencia.

### 3. CAPÍTULO 3: Diseño e implementación del sistema de adquisición y almacenamiento de datos de un radar de onda continua en frecuencia modulada montado en vehículo aéreo no tripulado

En el presente capítulo se detalla el diseño e implementación del sistema de adquisición de datos y almacenamiento, finalmente se describe el proceso de montaje en el vehículo aéreo no tripulado con la finalidad de adquirir los datos en vuelo.

#### 3.1 Consideraciones preliminares

El diseño de un radar de onda continua en frecuencia modulada consta de cuatro etapas, preliminarmente se cuenta con una base para trabajar las dos primeras etapas.

Se definieron los parámetros de radar LFM-CW, los cuales son importantes para poder obtener datos para la elección de los componentes de la unidad de radar (ver Tabla 3.1).

**Tabla 3.1 Parámetros del sistema de radar CW-FM [Fuente: Elaboración propia]**

Parámetros del Radar	
<b>Resolución de distancia</b>	50 cm
<b>Alcance Máximo</b>	150m
<b>Resolución Velocidad</b>	0.5 m/s
<b>Velocidad Máxima</b>	30 m/s

Con los parámetros establecidos se pudieron obtener las siguientes características del radar y sobre eso la elección de componentes (ver la Tabla 3.2).

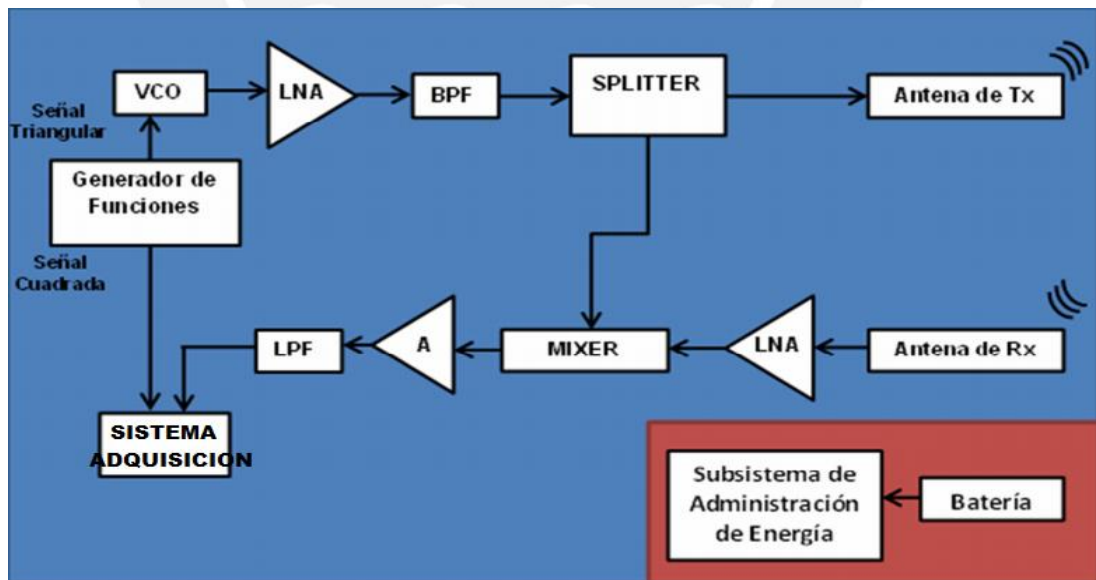
Con estos datos elaboramos el diagrama de bloques del sistema de radar CW-FM, (ver Figura 3.1).

**Tabla 3.2 Características del sistema de radar CW-FM [Fuente: Elaboración propia]**

Características del Radar CW-FM	
Tipo de Modulación	LFM-CW
Banda de Frecuencia de Operación	S Band
Frecuencia de Transmisión Central	2.4 GHz
Ancho de Banda	300 MHz
Frecuencia de Banda Base	15KHz
Tiempo de Pulso	20ms

### 3.1.1 Unidad de Radar

Para la transmisión de las señales los componentes más comunes son un VCO, un LNA, un splitter y una antena de transmisión. Para la recepción de las señales los componentes más comunes son una antena de recepción, LNA, un mixer y un filtro pasa bajos, de esta forma el resultado de la parte de recepción del radar es una señal de banda base [10] , en la tabla 3.3 se detalla los componentes de la unidad de radar.



**Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de radar CW-FM [Fuente: Elaboración propia].**

**Tabla 3.3 Tabla de Componentes de la Unidad de Radar [Fuente: Elaboración propia].**

<b><u>Componentes de la Unidad de Radar</u></b>		
<b>COMPONENTE</b>	<b>CRITERIOS DE SELECCION</b>	<b>FABRICANTE ELEGIDO</b>
Selección de Oscilador controlado por voltaje (VCO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia en la banda de 2.4 GHz.</li> <li>• Respuesta de frecuencia lineal.</li> <li>• Impedancia característica de 50 ohm.</li> <li>• Ancho de banda mínimo de 300 MHz.</li> </ul>	Mini-Circuits ZX95-2510+
Selección del Amplificador de bajo ruido (LNA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda de frecuencia de 2300 a 2600 MHz.</li> <li>• Figura de ruido mínima.</li> <li>• Mayor ganancia.</li> <li>• Mayor Potencia de Salida.</li> <li>• Menor Precio.</li> <li>• Menor consumo de corriente.</li> </ul>	Mini-Circuits ZX60-272LN+
Filtro Pasa Banda (BPF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda de paso de 2300 a 2600 MHz.</li> <li>• Menor pérdida de potencia posible en la banda de paso.</li> <li>• Menor medida de desadaptación (VSWR)</li> <li>• Menor precio.</li> </ul>	Mini-Circuits VBFZ-2340+
Selección del Divisor de Potencia (SPLITTER)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Divisor de potencia de 2 vías y 0 grados.</li> <li>• Frecuencia de 2300 a 2600 MHz.</li> </ul>	Mini-Circuits ZX10-2-42+

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínima pérdida por inserción por encima de 3 dB.</li> </ul>	
Selección del mezclador (MIXER)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La frecuencia LO/RF debe contener a la banda de 2.4 GHz.</li> <li>• La frecuencia IF debe contener la banda base hasta 15 KHz.</li> <li>• Menor pérdida por conversión.</li> </ul>	ZX05-C42MH+
Antenas Requeridas(2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancho de banda que contenga el rango de 2300 a 2600 MHz.</li> <li>• Impedancia de 50 ohms</li> <li>• VSWR cercano a la unidad.</li> </ul>	Planar Quasi Yagi

Se cuenta con un filtro pasa altos que pasan la banda de frecuencias entre 20Hz y 20 KHz además el filtro introduce un nivel de ganancia variable y amplifica la señal recibida por la antena de recepción (ver Figura 3.2) [10].

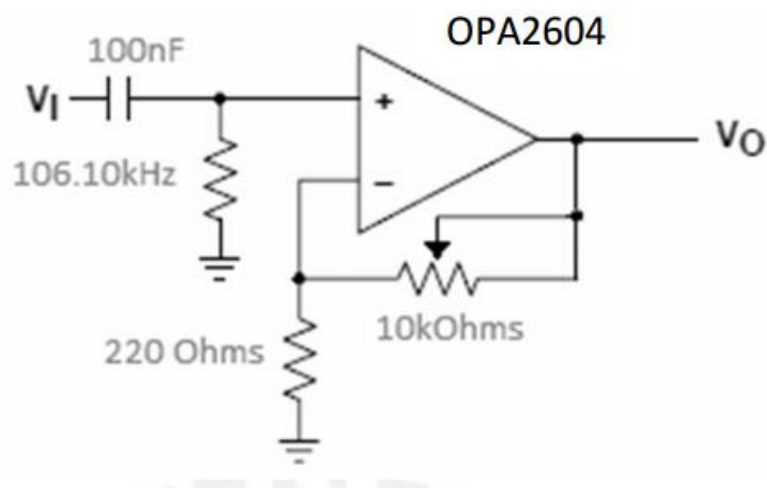
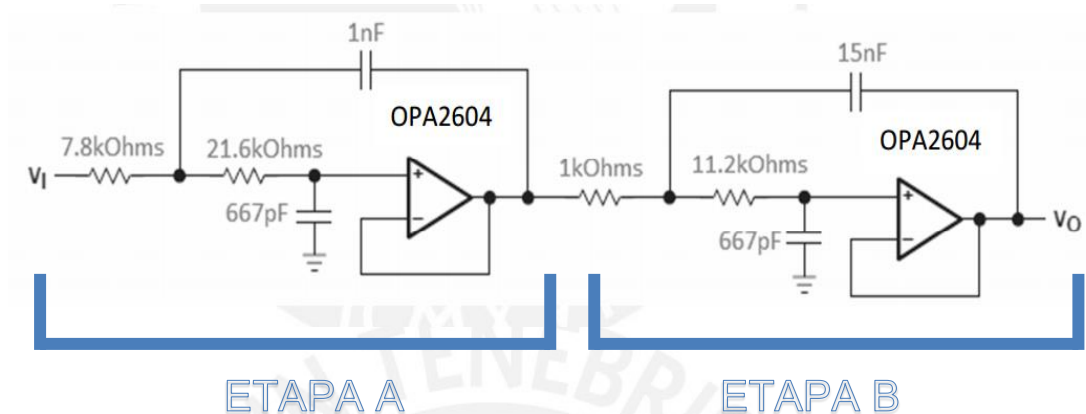


Figura 3.2: Filtro Activo de 1er Orden [10].

Finalmente un filtro pasa bajos para cortar la señal en 15KHz, (ver Figura 3.3).



**Figura 3.3: Filtro Butterworth de 4to orden topología Sallen-Key [10].**

Entre la etapa A y B conforman un filtro Butterworth de 4to orden topología Sallen-Key que tiene como finalidad cortar la señal en 15 KHZ.

### 3.1.2 Unidad de control

El radar se requiere de una etapa que genere una señal triangular sincronizada con una señal cuadrada.

Requerimientos:

- Capacidad para generar una señal triangular y cuadrada en simultáneo.
- Ciclo de trabajo de 50%.
- Amplitud de salida de 0-5 V.
- Menor Precio.

Bajo estos requerimientos se eligió el integrado XR-2206 de EXAR [10] (ver figura 3.4), se describe el generador de señales y en la Figura 3.5 la señal de sincronismo y la señal moduladora.



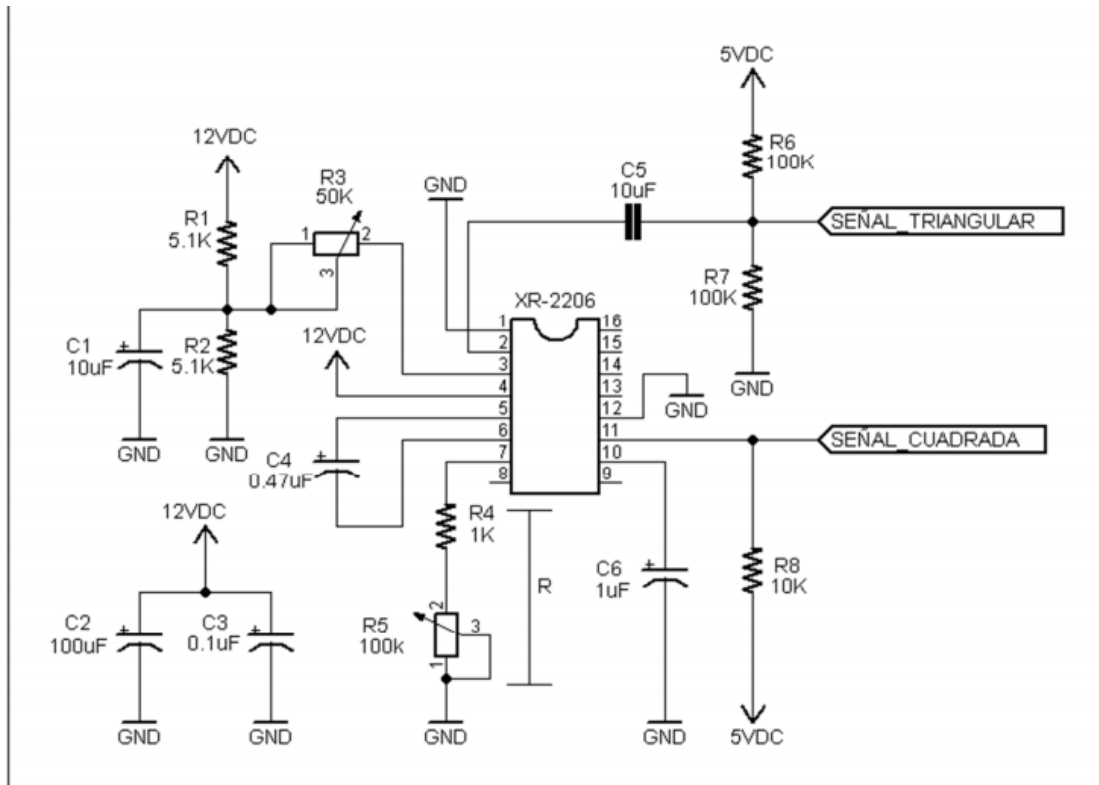


Figura 3.4: Generador de señales [10].

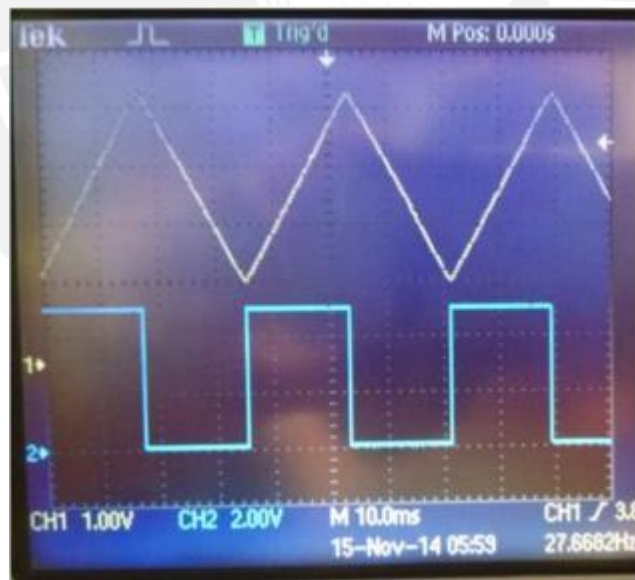
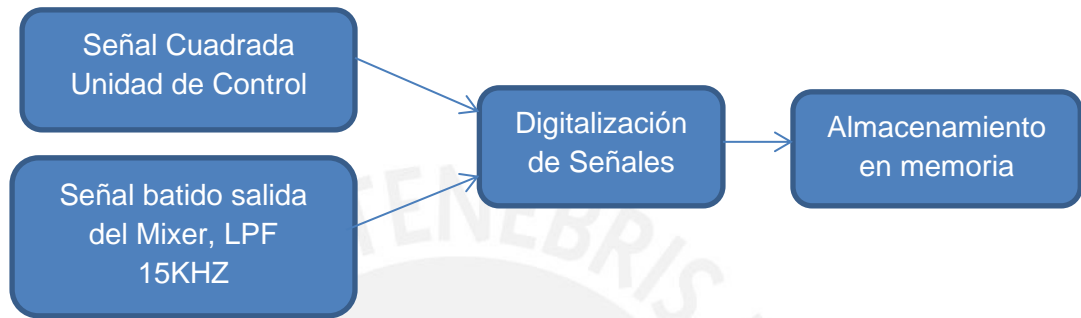


Figura 3.5: Señal de sincronismo y señal moduladora [10].

### 3.2 Diseño del Sistema de adquisición de datos

Luego de mencionar la estructura de las dos primeras etapas que engloba la elaboración de un sistema de radar CW-FM, diseñaremos la etapa de la adquisición de datos, esta etapa consta de dos partes, el proceso de digitalización de la señal y el almacenamiento de los datos obtenidos (ver Figura 3.6).



**Figura 3.6: Diagrama de bloques sistema de adquisición del radar CW-FM [Fuente: Elaboración propia].**

Recordemos que el proceso de digitalización sobresalen tres conceptos importantes: Muestreo, frecuencia de muestreo y resolución.

Por el teorema de Nyquist la frecuencia de muestreo  $f_s$  debe ser mayor a 30 KHz, ya que la máxima frecuencia de la señal de banda base en 15KHz (ecuación 3.1).

$$f_s \geq 2f_m \quad (3.1)$$

La mayoría de reproductores de sonido utilizan la frecuencia de muestreo de 44.100 KHz para el proceso de muestreo de la señal de audio, el valor cumple con el teorema de Nyquist.

Con respecto a la resolución de la señal se usara 16 bits, es la resolución estándar que posee el audio digital de consumo masivo.

Por lo tanto los requerimientos para el sistema de adquisición a usar son los siguientes:

- Frecuencia de muestreo 44.100 KHz.
- Tecnología ADC delta-sigma o pipeline.
- Muestrear dos señales en simultáneo (estéreo).
- Resolución 16 bits mínimos.
- Consumo de potencia bajo.
- Peso moderado no más de 200g.
- Portabilidad para acoplarse a la unidad de radar y control.
- Flexibilidad y fácil manejo del software para la configuración.
- Flexibilidad para posteriormente almacenar las señales muestreadas en una memoria lo más rápido posible.

### 3.2.1 Tecnologías para el sistema de adquisición de datos

A continuación se presentan 3 tecnologías para cumplir el requerimiento de la etapa de digitalización de la señal.

#### 3.2.1.1 Microcontrolador ADC Stereo PCM 1807

Este dispositivo cumple con todos los requerimientos de la etapa de digitalización (ver Figura 3.6), sin embargo un problema que surgió fue el tema del almacenamiento en memoria de los datos adquiridos, la complejidad hace que no sea una buena opción.

En la tabla 3.4 se detalla las características del ADC Estéreo PCM 1807.



**Figura 3.7: Microcontrolador PCM1807 [Fuente: Elaboración propia].**

**Tabla 3.4 Tabla de características ADC Stereo PCM 1807[Fuente: Elaboración propia]**

M	
Frecuencia de Muestreo	16-96 KHz
Capacidad de Señales	Estéreo o una sola señal
Resolución de ADC	Hasta 24 bits
Voltaje de entrada	3Vp-p
Peso	2g
Precio	22\$

### 3.2.1.2 Arduino Mega

Arduino es un Open Source que está impactando bastante en el mercado por su facilidad de realizar distintos proyectos, en el presente trabajo lo presentamos como una alternativa, ya que este dispositivo es versátil con el tema del almacenamiento de audio (ver Figura 3.8).

Sin embargo no cumple con los parámetros de la digitalización, ya que solo puede leer un solo canal (mono), tecnología ADC SAR por aproximaciones sucesivas, posee solo 8 bits de resolución, y solo llega a 22KHz de frecuencia de muestreo.



**Figura 3.8: Arduino Mega [Fuente: Elaboración propia].**

### 3.2.1.3 Raspberry PI2 y Cirrus Audio Logic Card

#### 3.2.1.3.1 Raspberry PI2

La tecnología Raspberry PI2, está revolucionando el mercado con sus diferentes aplicaciones que ofrece, además posee casi las mismas características de una PC, (ver Figura 3.9).

Es por eso que existen complementos para hacer este microcomputador más completo.

La falta de grabación de audio es un problema si se cuenta con una Raspberry PI2 sola, ya que no tiene una entrada analógica de audio(entrada Line), este problema se soluciona con la creación de un tarjeta de audio compatible con la versión Raspberry B+ y Raspberry pi2 , esta tarjeta tiene el nombre de Cirrus Logic Audio Card.



Figura 3.9: Raspberry PI2 [Fuente: Elaboración propia].

Tabla 3.5 Tabla de características de la RPI2 [Fuente: Elaboración propia].

CARACTERISITICAS RASPBERRI PI2	
SoC	Broadcom BCM2836
CPU	ARM11 ARMv7 ARM Cortex-A7 4 núcleos @ 900 MHz
Overclocking	Sí, hasta arm_freq=1000 sdram_freq=500 core_freq=500 over_voltage=2 de forma segura
GPU	Broadcom VideoCore IV 250 MHz. OpenGL ES 2.0

<b>RAM</b>	1 GB LPDDR2 SDRAM 450 MHz
<b>USB 2.0</b>	4
<b>Salidas de Video</b>	HDMI 1.4 @ 1920x1200 píxeles
<b>Almacenamiento</b>	microSD
<b>Ethernet</b>	Sí, 10/100 Mbps
<b>Tamaño</b>	85,60x56,5 mm
<b>Peso</b>	45g
<b>Consumo</b>	5v, 900mA, aunque depende de la carga de trabajo de los 4 cores
<b>Precio</b>	35 dólares

De las características expuestas en la Tabla 3.5, las más importantes son el hecho que posee una mayor velocidad de procesamiento y almacenamiento USB. El tener un microcomputador en nuestro sistema de adquisición nos da una versatilidad con el tema del almacenamiento.

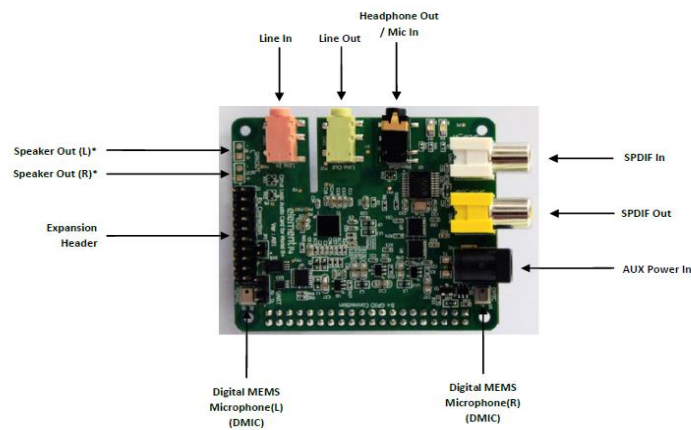
### 3.2.1.3.2 Cirrus Audio Logic Card

El Raspberry Pi2 tiene la limitación de no poder grabar audio, por esta idea nació las tarjetas de audio para las familias de Raspberry PI, primero la Wolfson audio card para la los modelos A, B. Hoy en día la empresa Cirrus Logic adquirió la empresa Wolfson, lo que permitió sacar al mercado la tarjeta audio Cirrus Logic (ver Figura 3.10), cuya compatibilidad es para el Raspberry PI B+ principalmente, más adelante se detallará el proceso de acoplamiento a las Raspberry Pi2.

Las características más importantes son las siguientes:

- Compatibilidad Raspberry Pi B+, Raspberry Pi2.
- ADC delta-sigma.
- Capaz de hacer HD Audio, a los 24 bits, 192 kHz.
- Jack de 3,5 mm de 4 polos para una combinación de micrófono auricular / pluma para aplicaciones de juegos o VoIP.
- Dos micrófonos DMIC a bordo para la grabación estéreo.
- Jack de 3,5 mm para la entrada de línea estéreo para la grabación de audio de alta calidad o de captura.
- Bajo peso.

- 3,5 mm de salida de línea jack estéreo para la conexión a dispositivos tales como amplificadores estéreo externos o altavoces con alimentación.
- Entrada estéreo digital y de salida (SPDIF).
- Precio 22 dólares.



**Figura 3.10: Cirrus Audio Logic Card [Fuente: Elaboración propia].**

Para nuestro propósito lo ideal es conectar la señal estéreo a la entrada Line In de la Cirrus Audio Logic Card ya que es la entrada para las grabaciones de audio.

Todo el sistema de adquisición conformado por el Raspberry Pi2 y Cirrus Audio Logic Card tendría un costo de 57 dólares.

Además presente una versatilidad para poder almacenar los datos sea en la microSD del Raspberry PI2 o en una memoria externa.

### 3.2.2 Justificación del circuito de adquisición de datos

Después de analizar las tres tecnologías presentadas decidimos quedarnos con el sistema de adquisición que conforma la Raspberry PI2 con la tarjeta de Audio Cirrus Logic por que cumple con todos los requerimientos de la etapa de digitalización y además posee una facilidad para almacenar los datos obtenidos sea en una microSD o USB flash disk, en las figuras 3.11 y 3.12 se muestran imágenes del sistema de adquisición de datos implementado.



Figura 3.11: Sistema de adquisición de datos [Fuente: Elaboración propia].



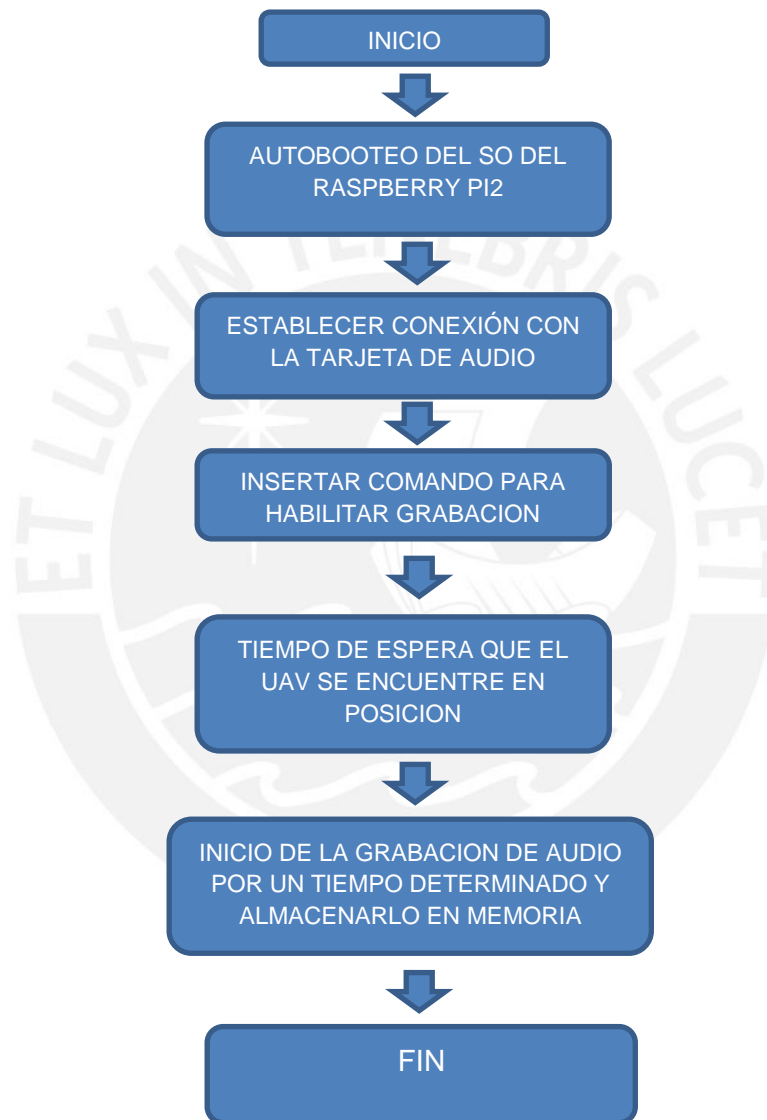
Figura 3.12: Sistema de adquisición de datos [Fuente: Elaboración propia].

### 3.2.3 Configuración e integración del sistema de adquisición

Una vez elegido el sistema de adquisición de datos a usar, tenemos que acoplarlo a la unidad de radar y la unidad de control pero antes debemos configurarlo para que pueda grabar y almacenar los datos según los parámetros requeridos.



La configuración tiene los siguientes pasos, primero conseguir el autobooteo del SO en el Raspberry PI2, luego establecer conexión con la tarjeta de audio, insertar los comandos para iniciar la grabación y darle un tiempo de espera para que el UAV pueda estar en vuelo para luego empezar con la grabación y almacenarlo en memoria, en la figura 3.13 se detalla el diagrama de flujo de la configuración.



**Figura 3.13: Diagrama de flujo del sistema de adquisición de datos basado en Raspberry PI2 y Cirrus audio logic card [Fuente: Elaboración propia].**

### 3.2.4 Configuración e integración del sistema de adquisición

El Raspberry pi 2 guarda todas sus configuraciones en la microSD, ahí es donde se instala los sistemas operativos y se realiza los cambios pertinentes.

Existen varios tipos de sistemas operativos que se le pueden instalar a la Raspberry PI2 como NOOBS y RASPBIAN. Elegiremos el sistema operativo Raspbian que es una distribución del sistema operativo LINUX, por lo tanto maneja los mismos comandos, además es un software de código abierto que proporciona mucha funcionalidad a nivel de programación.

Para la configuración del Raspberry PI2 con la Cirrus audio logic card se requiere saber conceptos de Linux, el siguiente paso es hacer que el sistema operativo realice un autboot para que esté listo para realizar la grabación de audio para posteriormente realizar el almacenamiento. Toda la configuración se realizó con un monitor LCD, un cable HDMI, un teclado y un mouse proporcionado por el laboratorio de Tecnologías Inalámbricas.

En la figura 3.14 se aprecia el monitor LCD usado para la configuración, y en la figura 3.15 los demás dispositivos como el teclado, mouse y raspberry.

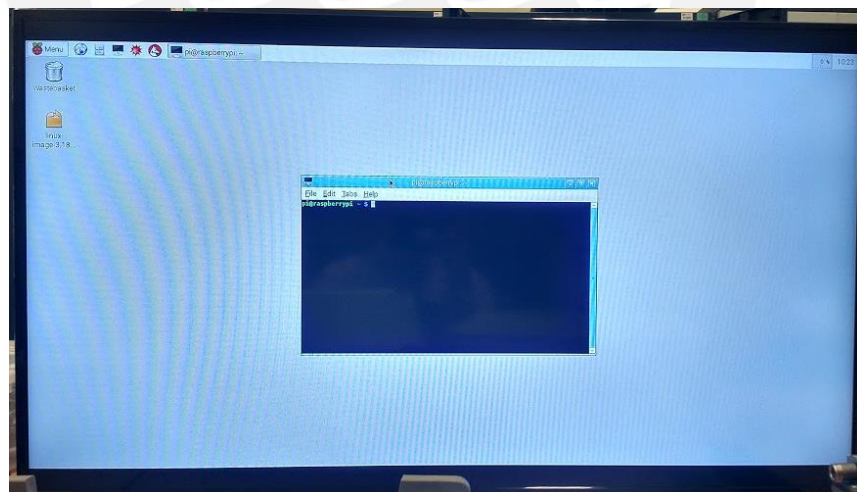


Figura 3.14: Monitor LCD para la configuración [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 3.15: Teclado, mouse y Raspberry pi2 para la configuración [Fuente: Elaboración propia].**

#### **3.2.4.1 Comunicación entre la Raspberry PI2 y Cirrus Audio Logic Card**

Para esta etapa se necesitó realizar una investigación, ya que el manual de instalación de la Cirrus audio logic card está destinado para Raspberry PI B+ y no para el Raspberry PI2.

Se consultó en foros de **“element14”** compañía distribuidora de la Cirrus audio logic card.

Entramos al foro donde la temática era si es posible la conexión entre la tarjeta de audio y el microcomputador RPI2, nos encontramos con el siguiente comentario:

*“Hi all!*

*As you might know, Cirrus Logic's main kernel source branch recently switched to 3.18.*

*My first thought was "Hmm, that means the Cirrus Logic card could finally work on the RPi2..."*

*I have built a couple of 3.18 kernels for my B+ and RPi2 and I have managed to get both models to produce sound*

*It's still early days, i.e. there are possibly bugs and glitches to fix, but for those of you who would like to try it out I've made an image file that you can download here:*

<https://drive.google.com/file/d/0BzIaxMH3N5O1cmJ1bFhMcG1hc0E/view?usp=sharing>

The file is a 1.3 GB zip. Uncompressed size is 3.1 GB, so it fits comfortably on a 4 GB card.

The image is based on the standard 2015-02-16-raspbian-wheezy image from the Foundation that you flash to a SD card for a fresh install. I have only added my kernels and set up the configuration files to get the card going. It should work on the older B model with a Wolfson Audio Card too, but I haven't tested that yet" [12]

Lo subrayado es una imagen con una actualización del kernel, corazón del sistema operativo Raspbian, que permite la comunicación entre ambas partes.

Se descargó la imagen y se subió a nuestro microSD y se comprobó si existe comunicación entre el Raspberry PI2 y la tarjeta de audio Cirrus audio logic, para esto se ingresa el comando `aplay -l`, el cual nos da un listado de todos los hardware conectados al Raspberry PI2, en la figura 3.16 se muestra la pantalla que valida la comunicación entre el RPI2 y la tarjeta de audio Cirrus logic.

```
aplay -l
**** List of PLAYBACK Hardware Devices ****
card 0: sndrpiwsp [snd_rpi_wsp], device 0: WM5102 AiFi wm5102-aif1-0 []
  Subdevices: 1/1
  Subdevice #0: subdevice #0
card 1: ALSA [bcm2835 ALSA], device 0: bcm2835 ALSA [bcm2835 ALSA]
  Subdevices: 8/8
  Subdevice #0: subdevice #0
  Subdevice #1: subdevice #1
  Subdevice #2: subdevice #2
  Subdevice #3: subdevice #3
  Subdevice #4: subdevice #4
  Subdevice #5: subdevice #5
  Subdevice #6: subdevice #6
  Subdevice #7: subdevice #7
card 1: ALSA [bcm2835 ALSA], device 1: bcm2835 ALSA [bcm2835 IEC958/HDMI]
  Subdevices: 1/1
  Subdevice #0: subdevice #0
```

nos indica que hay conexión

**Figura 3.16: Validación de comunicación entre RPI2 y Cirrus audio logic card [Fuente: Elaboración propia].**

### 3.2.4.2 Configuración del dispositivo de almacenamiento

Se manejó dos opciones almacenar los datos en la memoria microSD o en una memoria Flash Disk.

Debido a que la memoria microSD tiene todas nuestras configuraciones, se decidió usar como dispositivo de almacenamiento una memoria USB flash disk que estará a conectado a un puerto de la Raspberry PI2.

### 3.2.4.3 Configuración para la grabación y almacenamiento de audio

Una vez obtenido una correcta comunicación entre los dos dispositivos y configurado el puerto de almacenamiento, se procede a realizar el programa para que se realice la grabación de audio y el almacenamiento respectivo.

Los pasos son los siguientes:

1) Colocarnos en la carpeta PI que es donde se ejecutan los programas al prender el Raspberry PI2 automáticamente con el comando.

```
ls /home/pi
```

2) Luego crearemos un ejecutable con el comando chmod +x.

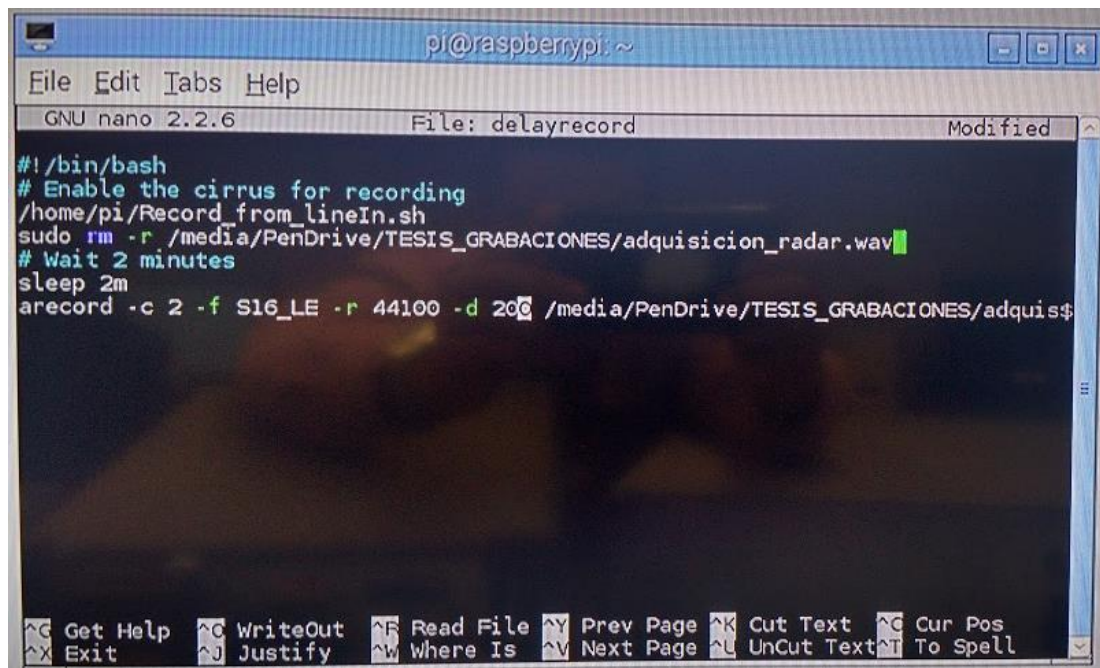
```
Chmod + delayrecord.sh
```

3) Entramos al archivo ejecutable que hemos creado.

```
Sudo nano delayrecord.sh
```

4) Finalmente ponemos el código para que se realice la grabación.

En la figura 3.17 se muestra el código para la grabación.



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: delayrecord Modified
#!/bin/bash
# Enable the cirrus for recording
/home/pi/Record_from_lineIn.sh
sudo rm -r /media/PenDrive/TESIS_GRABACIONES/adquisicion_radar.wav
# Wait 2 minutes
sleep 2m
arecord -c 2 -f S16_LE -r 44100 -d 200 /media/PenDrive/TESIS_GRABACIONES/adquisi$
^G Get Help ^C WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^G Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^L UnCut Text ^T To Spell
```

**Figura 3.17: Programa Ejecutable para la grabación y almacenamiento de datos [Fuente: Elaboración propia].**

La interpretación del programa es la siguiente:

- El comando `/home/pi/Record_from_lineIn.sh` habilita la opción de poder grabar los dos canales (estéreo) por la entrada Line de la tarjeta de audio.
- El comando `sudo rm -r /media/PenDrive/TESIS_GRABACIONES/adquisición_radar.wav` elimina el archivo adquisición\_radar.wav
- El comando `sleep 2m` entra en una etapa de retardo de 2 minutos que es con el objetivo que el UAV se estabilice.
- El comando `arecord -c 2 -f S16_LE -r 44100 -d200 /media/PenDrive/TESIS_GRABACIONES/adquisición_radar.wav` es el más importante del programa ya que aquí realiza los parámetros de digitalización y la dirección de almacenamiento.

En el arecord hay que resaltar los siguientes parámetros:

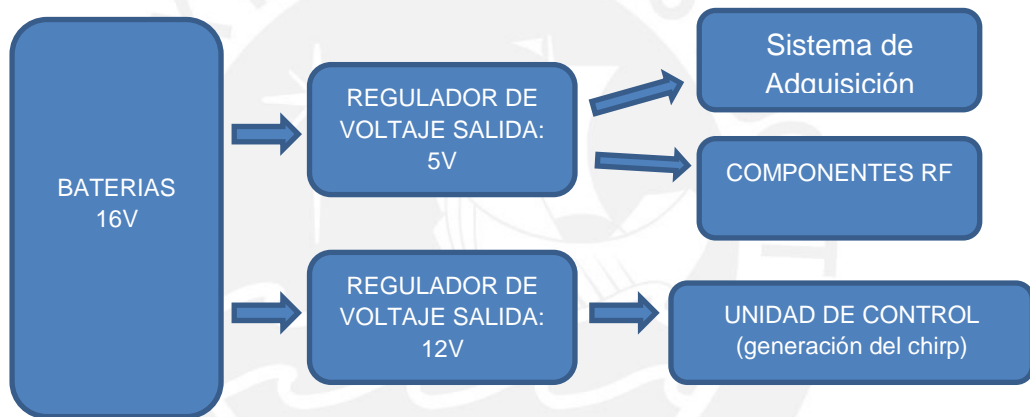
- c 2 → parámetro que indica que la grabación será de 2 canales.
- f S16\_LE → parámetro que indica que la resolución será de 16 bits.
- r 44100 → parámetro que indica que la frecuencia de muestreo es de 44KHz.

-d 200 → parámetro que indica la duración de la grabación 200segundos.

/media/PenDrive/TESIS\_GRABACIONES/adquisición\_radar.wav es la dirección en donde se grabará el archivo de audio, se eligió en formato WAV debido a ser el formato para una mayor calidad de audio y es compatible con distintas plataformas de Windows.

### 3.3 Diseño de la fuente de alimentación

Básicamente para esta etapa se requiere diseñar una fuente de alimentación que nos brinde 5V para los circuitos de RF, sistema de adquisición (Raspberry PI2 y Cirrus Audio Logic Card) y 12 V para la etapa de generación de chirp, ver el diagrama de bloques en la figura 3.18.



**Figura 3.18: Diagrama de bloques de la fuente de alimentación del sistema [Fuente: Elaboración propia].**

Se midió el nivel de consumo del sistema de adquisición de datos teniendo como resultado 393 mA a 6 V con una potencia de 2.3 Watts (ver figura 3.19).



**Figura 3.19: Consumo potencia del sistema de adquisición de datos [Fuente: Elaboración propia].**

Se midió el nivel de consumo del sistema de radar sin el sistema de adquisición y se obtuvo como resultado 140 mA con un voltaje de 5 V con una potencia 0.7 Watts (ver figura 3.20).



**Figura 3.20: Consumo potencia del radar [Fuente: Elaboración propia].**

Existen dos temas importantes en la fuente de alimentación, la elección de las baterías y la elección de los reguladores.

### **3.3.1 Elección de baterías**

Para el tema de la elección de baterías depende de cuánto consumo presente el sistema, en este caso el sistema presenta un consumo de 600 mA aproximadamente.

Así que para tener un tiempo de autonomía moderado (6 horas) necesitaremos unas baterías de 3000 mA.

Se eligió las baterías de Litio Energizer AA debido a que las baterías de Litio presentan una ventaja a nivel de duración de la batería, son más ligeras que las alcalinas y tienen menor tasa de auto descarga.

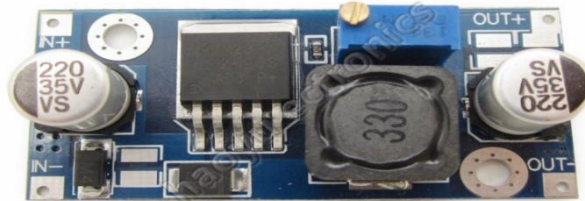
Se compró 10 baterías de litio de 1.5 V haciendo un total de 15 V aproximadamente.

### **3.3.2 Elección de los reguladores de voltaje**

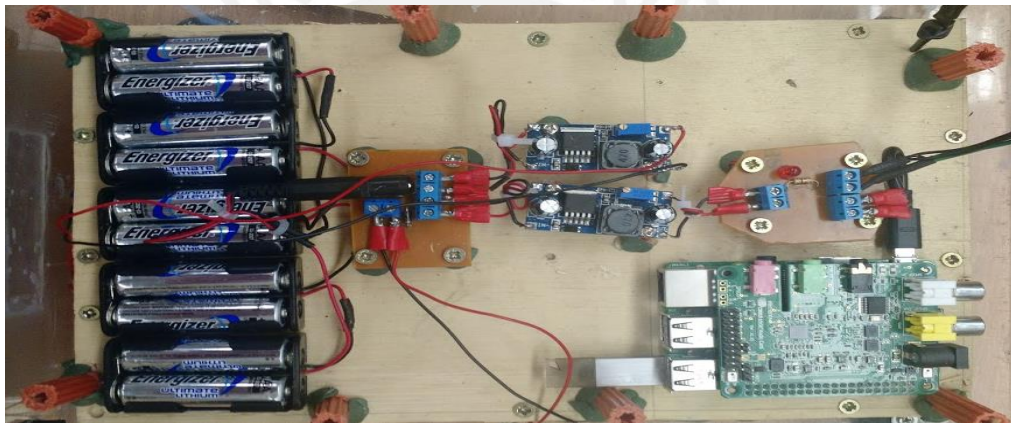
Se eligió un regulador de voltaje DC-DC LM2596 (ver figura 3.21) porque es una fuente conmutada ideal para el micro controladores como el Raspberry pi2, simplifica el diseño de fuentes tanto conmutadas como lineales, son muchos más eficientes a nivel de consumo de potencia y poseen mayor practicidad. Sus principales características son:



- Rango de voltaje de salida variable ajustable: 1.2 V a 37 V
- Corriente de carga de salida: 3 A.
- Rango de tensión de entrada máxima: 40 V.
- Frecuencia fija del oscilador interno: 150 KHz
- Modo de operación: Conmutación (switching)



**Figura 3.21: REDUCTOR DC-DC LM2596 [Fuente: Elaboración propia].**



**Figura 3.22: Diseño de la fuente de alimentación [Fuente: Elaboración propia].**

Con el diseño de la fuente se tiene una autonomía de 6 horas para el sistema de radar LFM-CW.

### 3.4 Elección del Vehículo Aéreo no tripulado

Para simular un radar SAR, el UAV más utilizado es uno de ala fija pero para estas pruebas contamos con un hexacóptero modelo SPREADING WINGS 800.



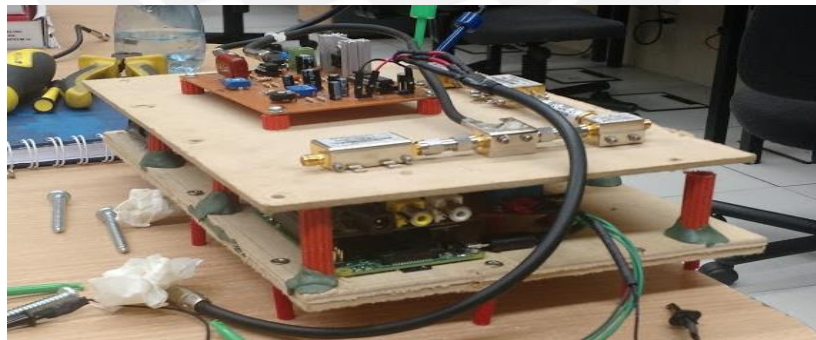
**Figura 3.23: HEXACOPTERO S800 [Fuente: Elaboración propia].**

Estos modelos pueden cargar un máximo de 4 Kg en la parte delantera del UAV, ya que en la parte de atrás van las baterías.

### **3.5 Diseño del chasis del sistema radar**

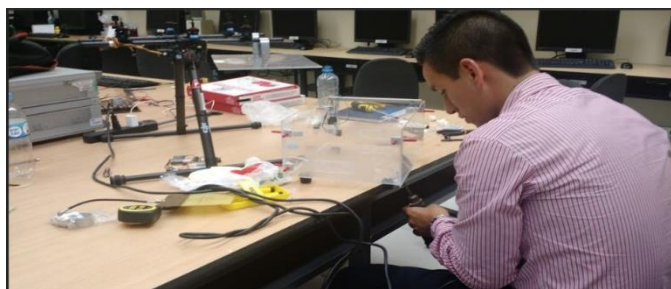
Para esta etapa se tiene como requerimiento hacerlo lo más compacto posible y que tenga un peso no mayor a 4 Kg para poder subirlo a un vehículo aéreo no tripulado.

Se decidió hacerlo en dos niveles para ocupar el menor espacio posible (ver Figura 3.24).



**Figura 3.24: Diseño del chasis del radar CW-FM [Fuente: Elaboración propia].**

Se trabajó en la caja que tendrá en el interior el sistema radar, se tuvo como referencia las patas del UAV (ver Figura 3.25).



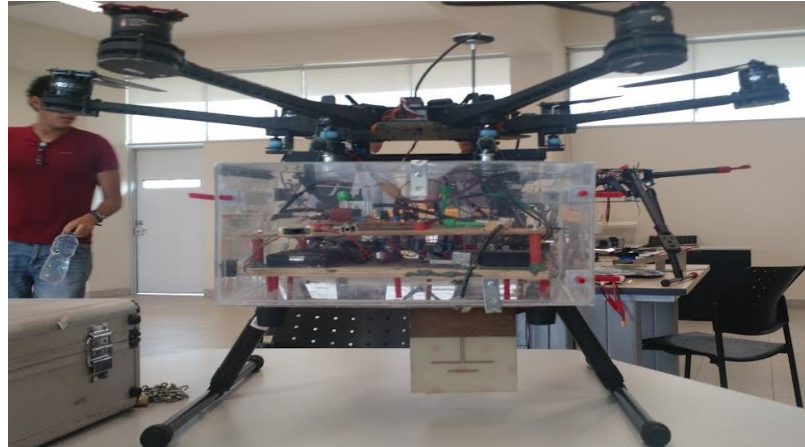
**Figura 3.25: Diseño del chasis del radar CW-FM para montarlo UAV [Fuente: Elaboración propia].**

Finalmente se realizó el chasis lo más compacto posible montado en el UAV, con las antenas direccionadas hacia abajo, ya que se requiere tomar los datos de terrenos por donde el UAV volará, (ver Figura 3.26).



**Figura 3.26: Diseño del chasis del radar CW-FM montado la base del UAV [Fuente: Elaboración propia].**

Por último se incorporó la base montada con el radar a las hélices del UAV y se obtuvo como final un prototipo de un radar SAR, (ver Figura 3.27).



**Figura 3.27: Radar CW-FM montado en un UAV [Fuente: Elaboración propia].**

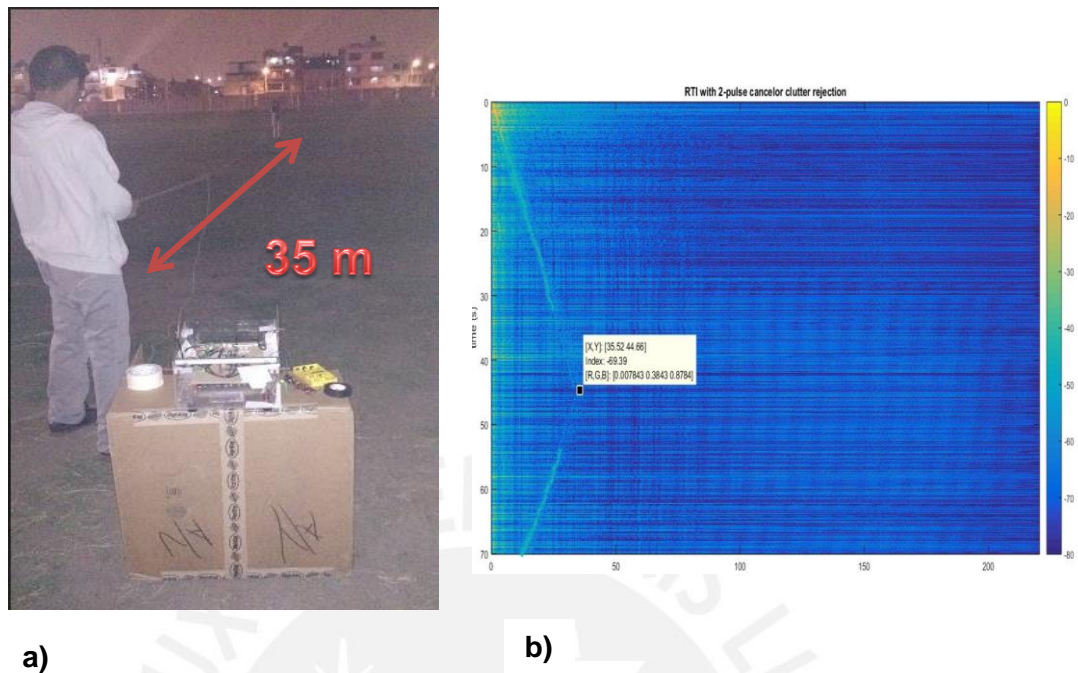
## **4. CAPÍTULO 4: Pruebas y resultados**

En el presente capítulo se muestra las pruebas y los resultados obtenidos del sistema de adquisición de datos tanto en tierra como en aire. Se realizará la validación del sistema desarrollado mediante un procesamiento para determinar el desplazamiento de un objeto en movimiento.

### **4.1 Pruebas en tierra**

El radar se ubicó en una posición fija mientras que el objetivo se iba desplazando a lo largo del haz del radar. Cabe mencionar que el objetivo considerado por el radar para las pruebas de distancia fue una persona. Las pruebas se hicieron en diferentes áreas o espacios para ver el desempeño del radar y la capacidad para diferenciar objetos.

#### 4.1.1 Pruebas en tierra de distancia en campo abierto



**Figura 4.1: Medición del Radar CW-FM estático en la cancha de fútbol PUCP [Fuente: Elaboración propia].**

Para estas pruebas se configuró el sistema de adquisición de datos para una grabación de 90 segundos así que el objeto con un cronómetro tendrá que realizar el recorrido en 90 segundos para tener unos datos más consistentes. En la figura 4.1a se muestra el recorrido realizado por una persona que cumple la función de objetivo del radar. La línea de color rojo muestra el recorrido de ida y a la vez la vuelta. Para esta prueba se muestreó y almacenó la señal de banda base desde el instante en que la persona se encontraba junto al radar hasta que volviera de su recorrido y nuevamente esté junto al radar. Este cambio de distancia a lo largo del tiempo se puede observar en la figura 4.1b La distancia de ida y vuelta es el mismo y su valor es de 35m con un tiempo de 90 segundos, lo cual está dentro del alcance establecido.

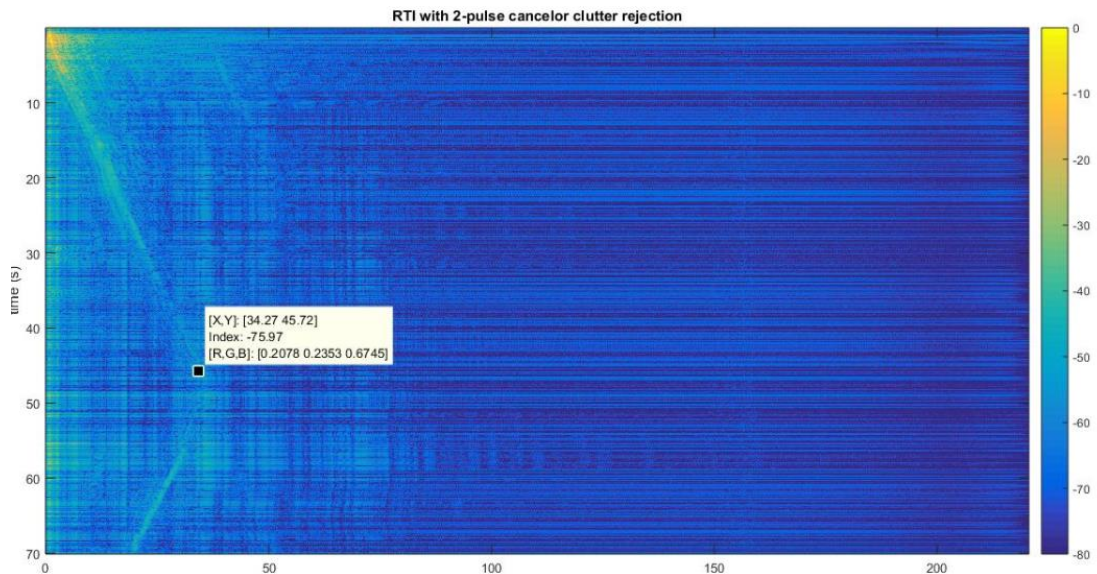
Por otra parte, se puede ver que a menor distancia se tiene mayor intensidad de potencia y conforme se va incrementando la distancia la intensidad de potencia va disminuyendo, con el rechazo de `clutter` se eliminan los ecos indeseables, por lo que la señal reflejada por objetos que permanecen estáticos se minimizará y la señal reflejada por los objetos en movimiento predominará sobre el resto de señales.

#### 4.1.2 Pruebas en tierra de distancia en espacios cerrados

Para esta prueba de igual manera se programó al sistema de adquisición con un tiempo de grabación de 90 segundos. El escenario fue el pasillo del 3er piso del pabellón "V" de Electrónica que es un lugar con mayor cantidad de obstáculos y señales de interferencia. El propósito de medir la distancia en este tipo de ambiente es medir la performance del radar y el sistema de adquisición de datos. De forma similar a la prueba en campo abierto, una persona será el objetivo del radar y se desplazará desde la posición del radar hasta una distancia de 36m para luego retornar nuevamente a la posición del radar. La figura 4.2 muestra el recorrido realizado por la persona. La figura 4.3 muestra el resultado del procesamiento donde se puede observar que la distancia del objetivo va incrementándose a lo largo del tiempo hasta llegar a 36m que es el instante en que el objetivo empieza a retornar hacia la posición del radar. También se puede observar que existen otros patrones de distancia ajenos al objetivo del radar los cuales se pueden interpretar como ruido o interferencia provocada por señales cuya frecuencia se encuentren dentro del rango de trabajo del radar. Finalmente se puede observar que el tiempo que le toma a la persona en recorrer ida y vuelta la distancia de 36m, es de 90 segundos.



**Figura 4.2: Medición del Radar CW-FM estático en el 3er piso pabellón V [Fuente: Elaboración propia].**



**Figura 4.3: Medición del Radar CW-FM estático en el 3er piso pabellón V [Fuente: Elaboración propia].**

## 4.2 Pruebas en vuelo

Luego de validar que el sistema de adquisición de datos está funcionando correctamente, se procede a validar el chasis que se elaboró, la finalidad es poder simular un sistema de radar SAR sin ningún problema de estabilidad en el UAV.

Para estas pruebas se usa el UAV, proporcionado por el equipo de Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú de aeronaves no tripuladas, cuyos requerimientos fueron hacerlo lo más compacto posible, un peso menor a 4 kilos y montarlo lo más fijo posible para que tenga una buena estabilidad en vuelo.

Como resultado de las pruebas en tierra, se concluyó que el radar tenía un alcance óptimo en 35m, por lo que se volará a una distancia de 20m de la superficie para obtener unos mejores datos.

### 4.2.1 Pruebas en vuelo, escenario: huaca de la PUCP

Se contó con la ayuda del grupo de investigación de aeronaves no tripuladas para el tema de controlar el UAV y puedan cumplir los requerimientos que se plantearon en el diseño, 2 minutos hasta que el UAV este bien posicionado para luego comenzar el barrido de la zona en un total de 200 segundos.

En la figura 4.4 se puede apreciar el terreno que será barrido por el radar SAR.



**Figura 4.4: Huaca PUCP, foto tomada desde un UAV [Fuente: Elaboración propia].**

En la figura 4.5 se aprecia el sistema de radar montado en el UAV listo para poder realizar el barrido.



**Figura 4.5: UAV con el sistema radar listo para hacer el barrido de la zona [Fuente: Elaboración propia].**



En la figura 4.6 se ve el sistema de rada en vuelo y realizando el barrido del terreno.

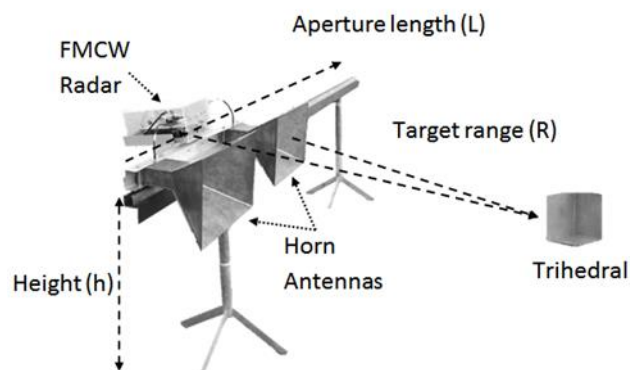


**Figura 4.6: UAV con el sistema radar realizando el barrido [Fuente: Elaboración propia].**

Finalmente, de las pruebas en vuelo se concluye que el chasis elaborado cumplió con los requerimientos y pudo mantenerse estable en vuelo, además que el sistema de adquisición de datos también se mantuvo operativo a lo largo del vuelo.

### 4.3 Actualidad del sistema de adquisición de datos

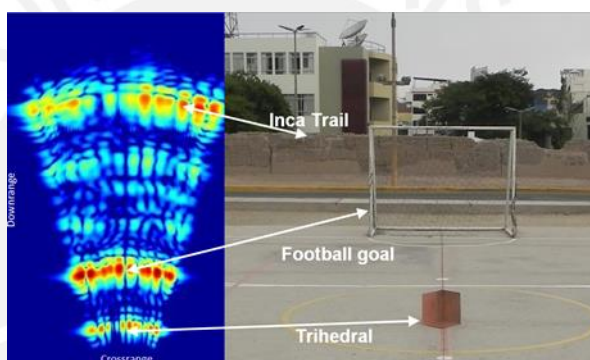
Actualmente el sistema de adquisición de datos ha sido implementado en un sistema SAR de carril, elaborado por el Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica, el radar está montado sobre un carril lineal (ver figura 4.7).



**Figura 4.7: Sistema SAR de carril [16].**

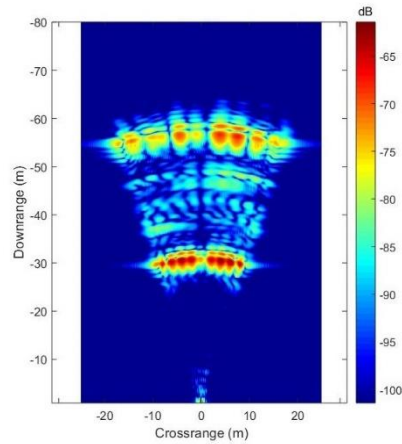
Las pruebas del sistema se realizaron en una cancha deportiva. Este escenario de medición contiene el dicroico a 21 m, luego un arco de fútbol a 29 m, y finalmente una parte del sendero inca a 56 m (que está dentro del campus como una estructura arqueológica) como se muestra en la figura 4.8. Utilizando el sistema de riel implementado con una longitud de 2,2 metros fue posible la adquisición y procesamiento de datos [16].

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que se validó que el sistema de adquisición y almacenamiento de datos funciona correctamente, y es óptimo para su posterior procesamiento y correcta generación de una imagen SAR [16].



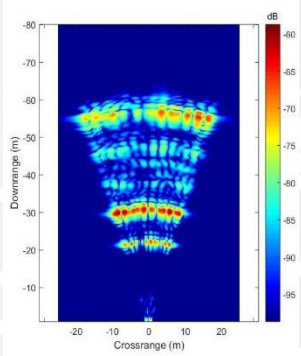
**Figura 4.8: Imagen SAR de la cancha deportiva y parte del sendero inca detrás (izquierda) y una fotografía de escena objetivo (derecha) [16].**

En la figura 4.9 se muestra la imagen generada a partir de los datos procesados del escenario de medición para asegurar la resolución de alcance de la imagen formada, con el fin de realizar la sustracción del “background”, es decir, estos datos e imagen no incluyen el dicroico [16].



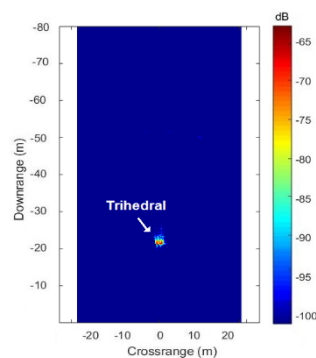
**Figura 4.9: Fondo medido para los datos de procesamiento y la formación final de imagen [16].**

En la figura 4.10 se observa la imagen SAR de un dicroico después de realizar la sustracción del “background” y la compensación de movimiento correspondiente [16].



**Figura 4.10: Imagen SAR medida del dicroico a 21 m del radar [16].**

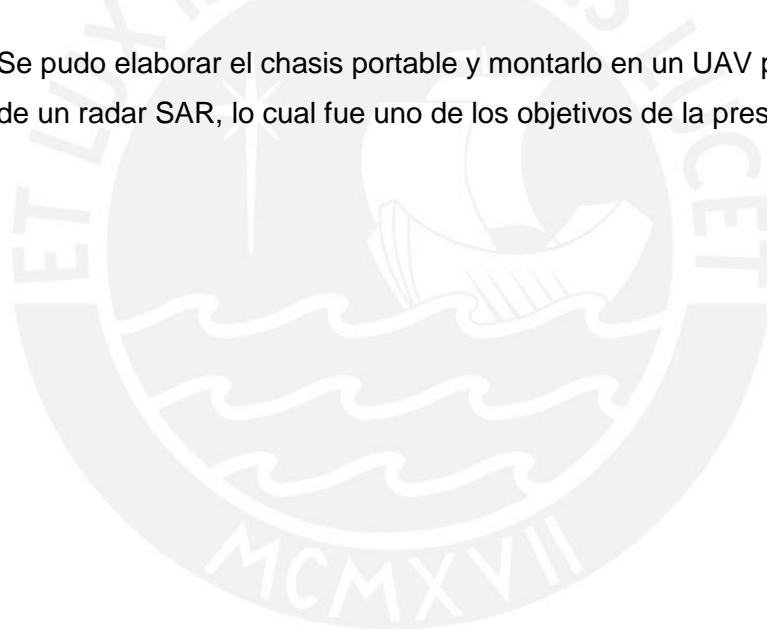
Finalmente utilizando el algoritmo de migración de rango, se obtiene la imagen final del dicroico (figura 4.11) [16].



**Figura 4.11: Imagen final de un dicroico utilizando el algoritmo de migración de rango (RMA) [16].**

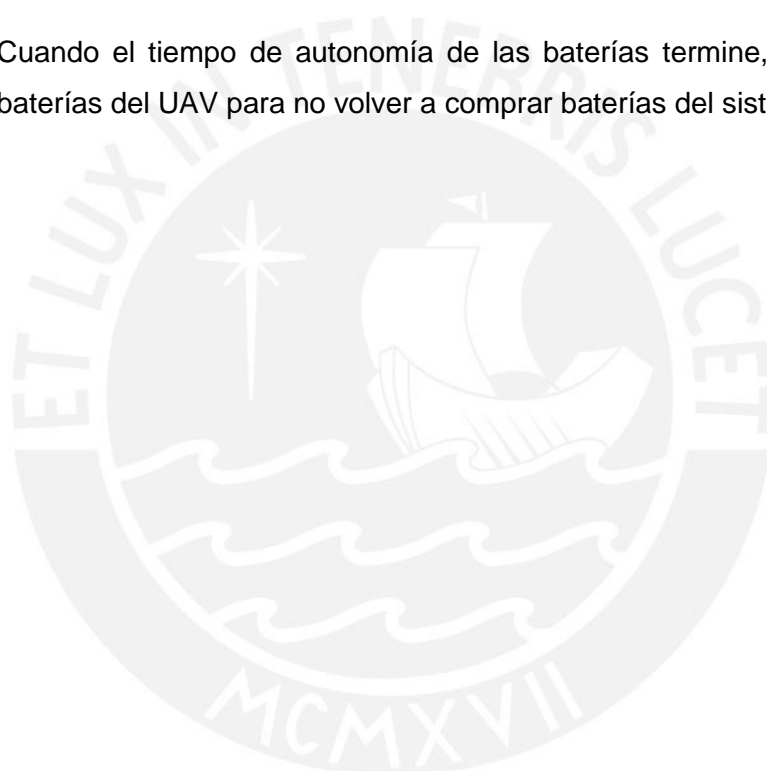
## CONCLUSIONES

- En la presente tesis se logró diseñar e implementar un sistema de adquisición para el radar CW-FM, que cumplió con los requerimientos de digitalización, es decir 16bits de resolución y 44 KHz de frecuencia de muestreo.
- El radar elaborado tiene un sistema de almacenamiento flexible, debido a que depende de la capacidad de memoria de tarjeta microSD, esto es importante ya que si requerimos más datos, podemos expandir la tarjeta microSD.
- El consumo de Raspberry PI2 fue inferior a la que indicaba su hoja de datos, lo que resalta la importancia de las pruebas, 393 mA de consumo mientras que en la hoja de datos estipulaba un consumo de 500 mA.
- Se pudo elaborar el chasis portable y montarlo en un UAV para la simulación de un radar SAR, lo cual fue uno de los objetivos de la presente tesis.



## RECOMENDACIONES

- Es posible cambiar la antena del prototipo con una de mayor ganancia siempre y cuando cumpla con los requerimientos de ancho de banda e impedancia característica. De esta forma se podrá tener un mayor alcance y unos mejores datos.
- Aumentar la resolución del sistema de adquisición a 24 bits para poder obtener una mejor señal.
- Cuando el tiempo de autonomía de las baterías termine, conectarlo a las baterías del UAV para no volver a comprar baterías del sistema radar.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. BALANIS, "Antenna theory: Analysis and Design", New Jersey: J. Wiley, 2005.
- [2] D. Pozar, "Microwave Engineering", Third Edition ed., University of Massachusetts at Amherst: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] E. D. J. O. J. Medina, «Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas,» de *Simposio de Metrología*, Santiago de Querétaro, México, 2008.
- [4] H. A. E. A. E. H. Kamel S. Sultan, «Novel, Compact and Multiband Antenna for Mobile and Wireless Communication,» de *Electronics Research Institute, Faculty of Engineering, Cairo University*, Giza, Egypt, 2013.
- [5] D. M. S. B. A. L. A. C. M. a. V. F. M. Farran, "Microstrip-fed quasi-Yagi antennas for WLAN applications," in *Proceedings of the 44th European Microwave Conference*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Brescia, 2014.
- [6] D. A. J. C. A. Luis Pacheco, *El Espectro Radioeléctrico como herramienta para la promoción de la expansión de los servicios móviles y la competencia en el Perú*, Lima, Perú, 2013.
- [7] X. a. J. Y. Yuan Yao, *Multiband Planar Monopole Antenna for LTE MIMO Systems*, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, : Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- [8] S. E. KATHERIN GRIFFI, «Antenas planares para Beamforming utilizando elementos Quasi Yagis,» de *Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones*, Lima, 2013.
- [9] MTC, «Líneas Instaladas y en Servicio, según Modalidad de Servicio: 2009-2013,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, [En línea]. Available: <http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/comunicaciones.html#s2>. [Último acceso: 26 Junio 2015].
- [10] Osiptel, «Reporte Estadístico Abril 2015,» [En línea]. Available: [http://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Publicaciones/reporte\\_estadistico\\_n09/reporte\\_estadistico\\_e09.html#1/z](http://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Publicaciones/reporte_estadistico_n09/reporte_estadistico_e09.html#1/z). [Último acceso: 27 Junio 2015].
- [11] V. V. D. Siddhesh Uttam Chavan, «Design and Implementation of Dual and Triple Band Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4, pp. 690-692, 2015.

- [12] P. C. B. a. P. M. M. N. Suma, «A Wideband Printed Monopole Antenna for 2.4-GHz WLAN Applications,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, nº 5, pp. 871-873, 2006.
- [13] E. F.-R. Raúl L. Katz, «Beneficios Económicos del Dividendo Digital para América Latina,» GSMA / AHCLET, 2011.
- [14] T. V. B. G. Nguyen Minh Tran, «Dual-band Microstrip Antenna for 4G-LTE Handheld Devices,» *VNU Journal of Science: Comp. Science & Com. Eng.*, vol. 31, nº 1, p. 55–59, 2015.
- [15] A. K. & S. Singh, «Designing and Analysis of T-Shape Microstrip Antenna for the 4G Systems,» *Global Journals Inc*, vol. 13, nº 1, 2013.
- [16] M. A. Yarlequé Medina, S. Alvarez Navarro y H. J. Martínez Odiaga, «Synthetic aperture radar (SAR) imaging based on low-cost FMCW radar for mini-UAVs,» *IEEE explorar*, 2016.

