



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Daniel Enrique Maldonado Nieves**

# **Sistema de generación de imágenes mediante RADAR**

**Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico**



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

**Valparaíso, 19 de abril de 2018**



# Sistema de generación de imágenes mediante RADAR

Daniel Enrique Maldonado Nieves

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Francisco Pizarro Torres  
Profesor Guía

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza  
Director de Escuela

Valparaíso, 19 de abril de 2018

***A Dios.***

*Por acompañarme en toda esta etapa de mi vida, por haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

***A mis padres Marcia y Sergio.***

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por sus valores, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, tanto académico, como en la vida y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. ¡Los quiero mucho!*

***A mis familiares.***

*A mi hermano Carlos por ser el ejemplo de un hermano mayor, por tu paciencia, por tu constante apoyo y cariño en todo momento, por siempre estar ahí, en los momentos buenos y difíciles, gracias hermano.*

*A Sandra y Guillermo, por haber sido mi segunda familia durante toda mi carrera universitaria, por su constante apoyo, cariño y comprensión en todo ese tiempo.*

***A mis amigos.***

*Por ser quienes han compartido conmigo en toda esta etapa de mi vida, por apoyarnos mutuamente en todo o parte de este proceso y que hasta ahora, seguimos siendo amigos: Esteban, Joaquín, Lisa, Jaime, Francisco, Flavio, Ohbrayan, Rebeca, Osvaldo, Boris, Franco y a Los SanDra's Crew. En general, a cada persona que fue parte de este camino.*

***A mis profesores.***

*Por su gran apoyo y motivación en la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración del informe final, por su tiempo y por la ayuda ofrecida frente a mis dudas durante este proceso, muchas gracias.*

# Resumen

La vigilancia aérea de terrenos u objetos específicos dentro de un área, está ganando cada vez más importancia para un gran número de actividades humanas; la vigilancia de las zonas agrícolas, el constante monitoreo del relieve terrestre y oceánico, entre otros. La idoneidad de cada uno de los climas presentes en las zonas y las diferentes características físicas de los terrenos, demandan a menudo la capacidad de mirar a través de polvo, de humo, de niebla, de lluvia, ausencia de luz solar, etc. Así como también de tener la suficiente sensibilidad para poder detectar o dar una noción del estado en el cual se encuentra el terreno, ya sea, líquido, viscoso, húmedo, etc. Es por esto que se hace necesario de un sensor o un sistema que tenga la capacidad de desenvolverse en cada uno de estos escenarios de la mejor manera posible y a la vez que pueda generar imágenes de una buena resolución, logrando así un monitoreo que cumpla con las expectativas deseadas.

El radar de apertura sintética (SAR) en plataformas como satélites, aviones, drones o rieles ofrece la oportunidad de estudiar deformaciones y cambios que suceden en la Tierra a través del procesado de la señal recibida por el sistema. El procesado de la señal se realiza mediante algoritmos diseñados para el tipo de información capturada.

En concreto, en este documento se analizará en profundidad el principio de funcionamiento y la fabricación del radar LFM-CW. Radar que fue desarrollado por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) en su curso extracurricular: *Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imagin*. Este sistema permite generar imágenes de un objetivo o zona terrestre utilizando la técnica de apertura sintética. Buscando de esta forma una solución a la problemática planteada.

También se darán a conocer los resultados de las pruebas realizadas, las cuales se llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, específicamente en el tercer piso de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE). Obteniendo resultados favorables respecto a la generación de imágenes del terreno y monitoreo del lugar.

Palabras claves: radar LFM-CW, radar de apertura sintética, MIT, vigilancia aérea, SAR.

# Abstract

Aerial surveillance of specific objects within an area is gaining increasing importance for a large number of human activities; the surveillance of agricultural areas, the constant monitoring of land and ocean relief, among others. The suitability of each of the climates present in the zones and the different physical characteristics of the land, often demand the ability to look through dust, smoke, fog, rain, sunlight, etc. as also it is necessary to consider the state in which the land is, the sea, liquid, viscous, humid, etc. That is why you need a sensor or a system that has the ability to perform in each of these scenarios in the best way possible, which can generate images of a good resolution, thus achieving a monitoring that meets the desired expectations.

Synthetic aperture radar (SAR) on platforms such as satellites, airplanes, drones or rails offers the opportunity to study deformations and changes that happen on Earth through the process of the signal received by the system. The signal process was carried out using algorithms designed for the type of information captured.

In particular, this document will analyze in depth the principle of operation and manufacture of the LFM-CW radar. Radar that was developed by the Massachusetts Institute of Technology (MIT) in its extracurricular course: Build a small radar system capable of detecting range, Doppler and Imaginary synthetic aperture radar. This system allows to generate images of a target or terrestrial area using the synthetic aperture technique. Looking for this form a solution to the problem posed.

The results of the tests carried out were also made known, which were carried out at the Faculty of Engineering of the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, specifically on the third floor of the School of Electrical Engineering (EIE). Obtaining favorable results regarding the generation of terrain images and site monitoring.

Keywords: LFM-CW radar, synthetic aperture radar, MIT, aerial surveillance, SAR.

# Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos .....	3
1 Radar LFM-CW del MIT .....	4
1.1 Conceptos básicos del Radar .....	4
1.2 Geometría del Radar de Apertura Sintética .....	6
1.3 Descripción del radar LFM-CW del MIT.....	8
1.4 Señales de interés del radar y principio de funcionamiento .....	9
2 Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW.....	14
2.1 Inventario de los principales componentes y balance de potencia DC del radar.....	14
2.2 Antenas .....	16
2.2.1 Diseño de antenas impresas tipo Yagi.....	17
2.3 Balance de potencia interna .....	22
2.4 Balance de potencia de RF de espacio libre .....	23
2.5 Estimación de los parámetros de desempeño del radar .....	25
3 Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR.....	27
3.1 Sistema fabricado basado en el radar LFM-CW del MIT.....	27
3.2 Algoritmo utilizado para el procesamiento de la señal .....	32
3.2.1 Algoritmo Range-Migration en MATLAB .....	32
3.3 Metodología utilizada para realizar la generación de imágenes mediante el radar LFM-CW fabricado.....	41
3.4 Resultados obtenidos .....	45
Conclusiones.....	57
Trabajos a futuro.....	59
Bibliografía .....	60
A Apéndice.....	63

A.1 Presupuesto de los componentes del circuito .....	63
B Apéndice.....	65

# Introducción

El uso de imágenes por Radar de Apertura Sintética (SAR) en los últimos 20 años se ha expandido considerablemente a través de numerosas aplicaciones de percepción remota. Este tipo de sistema permite observar procesos dinámicos que se producen en la superficie terrestre, y que tienen impacto en distintas áreas, como el mapeo y monitoreo de la vegetación, la hidrología, hielo marino y geología, entre otros [1].

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sistema de radar que ilumina un área de la superficie terrestre mediante la transmisión de pulsos electromagnéticos en el rango de las microondas [1]. Estos pulsos son reflejados desde el área iluminada y recibidos por la antena del SAR. La transmisión de pulsos se realiza apuntando el rayo de la antena aproximadamente en dirección perpendicular a la del vector de velocidad de la plataforma [1].

El SAR, al ser un sensor activo y al trabajar en el rango del espectro de las microondas, presenta algunas ventajas considerables por sobre los sensores ópticos. Estas ventajas han permitido el incremento del uso de imágenes SAR en la comunidad de teledetección. Algunas de las principales ventajas son [1].

- Porta su propia iluminación, es decir, es un sistema que no depende de factores externos para realizar la adquisición de datos, solo de su propia fuente de energía, lo que permite adquirir imágenes tanto de día como de noche sin depender de las condiciones de iluminación del sol.
- Las microondas atraviesan nubes y lluvias con muy bajo o nulo deterioro de la señal.
- Las microondas se retrodispersan en los materiales de una forma diferente a la energía óptica, proveyendo información complementaria a la provista por sensores ópticos.
- La posibilidad de la utilización de diferentes polarizaciones para envío y recepción de la señal en los SAR polarimétricos (envío horizontal o vertical y recepción horizontal o vertical). Dado que los materiales anisotrópicos, como son la gran mayoría de los presentes en una escena, frecuentemente reflejan diferentes polarizaciones con diferentes intensidades, estas combinaciones proveen una matriz de información por cada elemento en la escena y suele ser muy útil para su uso en clasificaciones.

Las imágenes SAR que son provistas por estos sistemas a los usuarios finales y a investigadores para diferentes aplicaciones, necesitan de un proceso complejo denominado “focalización” o “compresión” [2]. Este procesamiento es el encargado de convertir los datos crudos (o matriz RAW) adquiridos por el sensor en una imagen de fácil interpretación.

El impacto que tiene la calidad de la “imagen focalizada” en el resto del procesamiento es crucial, y es por ello que uno de los puntos más importantes de toda la cadena de generación de imágenes SAR, incluyendo la adquisición misma, es el algoritmo utilizado para realizar la focalización [3].

Distintos algoritmos de focalización han sido propuestos a lo largo de los años, entre los cuales se destacan tres por su precisión. El más antiguo de ellos es el algoritmo *Range-Doppler* (RDA) propuesto por Wu en 1976 [4]. Luego se desarrollaron casi en simultaneo el algoritmo *Omega-K* ( $\omega KA$ ) o también conocido como el algoritmo *Range Migration* (RMA) en el politécnico de Milán por Cafforio, Prati y Rocca en el año 1991 [5] y el algoritmo *Chirp Scaling* (CSA) en 1992 por Runge y Bamler de la Agencia Espacial Alemana (DLR) [2]. Estos tres algoritmos se han convertido en los más utilizados en el mundo del procesamiento SAR y diversos estudios han surgido comparando su desempeños [6].

En este trabajo se le dará mayor énfasis al algoritmo RMA, el cual se describirá paso a paso tanto en su estructura como en su aplicación a través del software MATLAB. Este software permitirá realizar el procesamiento de datos recibidos por el radar y lograr la formación de la imagen SAR.

Si bien existen varios artículos, tesis y libros que documentan el diseño de radares de apertura sintética, o partes de este, a nivel de hardware, y en mayor medida existen muchos libros que describen los principios de funcionamiento, muy pocos describen un procedimiento sistemático de diseño. Siendo que los sistemas SAR son desarrollados principalmente por universidades y agencias espaciales, son escasos los ejercicios de diseño, fabricación y prueba de radares de apertura sintética que hayan sido documentadas con un elevado nivel de detalle [7].

De la literatura disponible los principales que se pueden encontrar son: La empresa iRadar, la cual a partir de la experiencia acumulada por sus miembros en el Centro de Microondas para la Observación Remota de la Tierra y Tecnologías de Vigilancia (CRSST), ha documentado ampliamente su trabajo desde el año 1997, cuando comenzaron hacer sus investigaciones, hasta el año 2010, cuando probaron su primer UAVSAR [8], [9]. El consorcio de compañías SunSpace, Kentron y el grupo de observación remota de la tierra (RRSG: *Radar Remote Sensing Group*), fabricaron y probaron el “*South African Synthetic Aperture Radar II*”. El proyecto fue realizado con una arquitectura modular, varios de cuyos sub-sistemas fueron realizados a partir de tesis de maestrías [10], [11]. Por último se tiene al MIT, el cual ofrece un curso extracurricular: *Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imagin*, en que los estudiantes fabrican y prueban un radar sencillo de onda continua con modulación lineal de frecuencia FMCW, estos criterios de diseño y fabricación se basan en las tesis de maestrías de [12].

Como se puede ver, el diseño de un radar de apertura sintética es un ejercicio de ingeniería abierto, es decir, se tienen muchos grados de libertad, y no existe una única manera de emprenderlo.

En concreto, en este documento se analizará en profundidad el principio de funcionamiento del radar LFM-CW (radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia) diseñado por el MIT y su fabricación. Este análisis, en primer lugar se realiza describiendo detalladamente el diagrama de bloques del funcionamiento del radar, sus principales señales de interés, su balance de potencia DC y su balance de potencia tanto interna como de RF en espacio libre del radar. También se explican las mejoras que se le realizaron y como estas mejoras aumentan algunos de los parámetros de desempeño de este radar.

En segundo lugar se detalla su fabricación, el algoritmo utilizado para el procesamiento de la señal, la metodología utilizada para realizar la generación de imágenes y las consideraciones que se deben tener al momento de utilizar el radar LFM-CW para lograr una correcta generación de imagen tipo SAR.

Por último, se dan a conocer los resultados obtenidos con el sistema de generación de imágenes fabricado.

### **Objetivos generales**

- Analizar y fabricar un sistema de generación de imágenes basado en el radar LFM-CW diseñado por el MIT.

### **Objetivos específicos**

- Investigar sobre las distintas características y parámetros de desempeño del radar fabricado.
- Investigar sobre las mejoras que se le pueden realizar al sistema SAR diseñado por el MIT.
- Investigar sobre los distintos algoritmos de focalización de imágenes SAR aplicables a este tipo de radar.
- Analizar los resultados obtenidos.

# 1 Radar LFM-CW del MIT

En este capítulo se dará a conocer los conceptos básicos del radar, luego se describirá detalladamente el diagrama de bloques y el principio de funcionamiento del radar LFM-CW desarrollado por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

## 1.1 Conceptos básicos del Radar

Como se indica en [13] la palabra “RADAR” es un término derivado del acrónimo en inglés *Radio Detection and Ranging*, “Detección y Medición de Distancia por Radio”. En general, el radar mide la distancia, o rango, a un objeto mediante la transmisión de una señal electromagnética y la recepción de un eco reflejado desde el objeto. Ya que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, basta con medir el tiempo que tarda la señal del radar en propagarse al objeto y volver para calcular la distancia a la que está el objeto. La distancia total recorrida por la señal es el doble de la distancia entre el radar y el objeto, ya que la señal viaja desde el radar hasta el objeto y luego de vuelta del objeto al radar después de la reflexión, ver Figura 1-1.

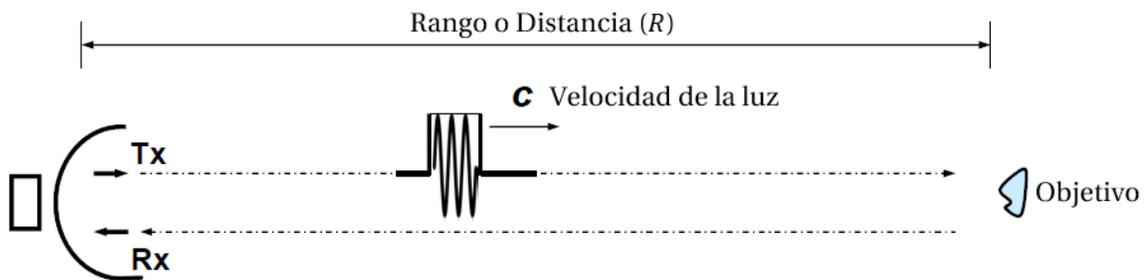


Figura 1-1: Principio de medición del radar [14].

Por lo tanto, una vez que se mide el tiempo de propagación ( $t$ ), se puede calcular fácilmente el rango ( $R$ ) como [13]:

$$R = \frac{1}{2}ct \quad (1-1)$$

Donde,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. El factor  $1/2$  explica el hecho que la señal del radar viaja realmente dos veces la distancia medida (ver Figura 1-2). Si la propiedad eléctrica del medio de propagación es diferente a la del vacío, la velocidad de propagación real tiene que ser estimada por técnicas avanzadas de radar, tales como el Radar de Apertura Sintética (SAR).

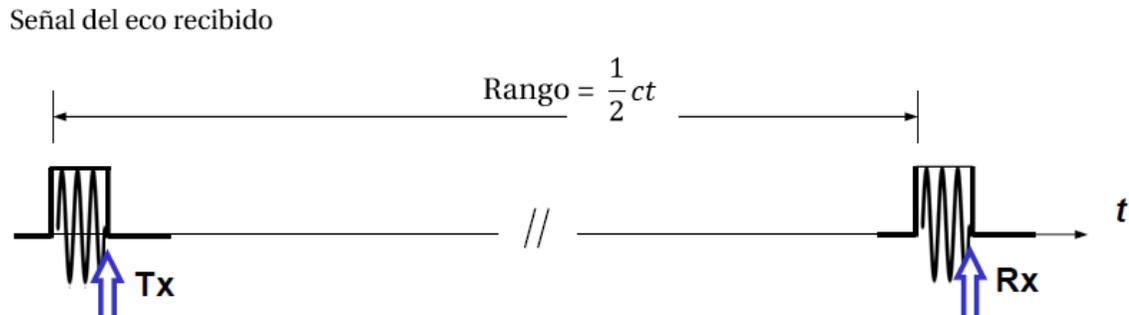


Figura 1-2: Relación entre la velocidad de la luz  $c$ , rango ( $R$ ) y tiempo de propagación ( $t$ ) del eco recibido por el radar [14].

La mayoría de los radares que producen imágenes son de vista lateral (SLAR: *Side Looking Airborne Radar*), dentro de estos se encuentran dos tipos de radar: radar de apertura real (RAR: *Real Aperture Radar*) y radar de apertura sintética (SAR: *Synthetic Aperture Radar*).

El mayor problema de los sensores RAR radica en su baja resolución espacial como consecuencia del escaso diámetro de la antena, donde el tamaño mínimo del objeto identificable en la imagen está en relación directa con la longitud de onda y la altura de observación y es inversamente proporcional al diámetro de la apertura [15]. En una plataforma espacial o terrestre ya sea satelital, drone o un riel de desplazamiento, sería imposible lograr una buena resolución de este sistema, dado que sería preciso contar con antenas de enormes proporciones.

En cambio los sensores SAR permiten simular una antena mediante la sucesión de señales recibidas por una antena real situada a bordo de una aeronave o plataforma. Esta antena se denomina de apertura sintética, y se basa en el efecto Doppler que afecta a la observación cuando hay un movimiento relativo entre el objeto y el sensor.

Se requiere dos procesos para producir una imagen SAR: el sensor debe desplazarse a cierta altitud sobre la zona y registrar una sucesión de señales de cada objeto y además debe procesarse la sucesión de señales para formar una imagen reconocible (ver Figura 1-3). Debido a la manera en que son generadas las imágenes SAR se producen problemas para la visualización y el análisis de los datos adquiridos por este sistema. Por tratarse de un haz emitido artificialmente, pueden controlarse las condiciones de adquisición: ángulo, distancia, orientación, polarización, etc.

Dependiendo de la forma de la onda transmitida los radares también pueden clasificarse en pulsados y de onda continua [16], [17] y [18]. En este aspecto, el radar que se está analizando y fabricando opera con la modalidad LFM-CW [17], [16], que significa "*Linear Frequency Modulated Continuous Wave*", es decir, radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia. Como el nombre indica, es un radar que emite y recibe señal modulada en frecuencia constantemente,

sin interrupciones, el cual a su vez está montado sobre una plataforma que permite su desplazamiento, de esta forma logrando la apertura sintética del radar (ver Figura 1-3). La emisión continua de la señal permite conocimiento de la velocidad de los objetos a analizar y la modulación de ésta permite conocer la distancia a la que se encuentran los objetos en la escena, lo que constituye su gran ventaja. Además, tiene la capacidad de detectar objetos cercanos al radar, lo que constituye su segunda gran ventaja [19].

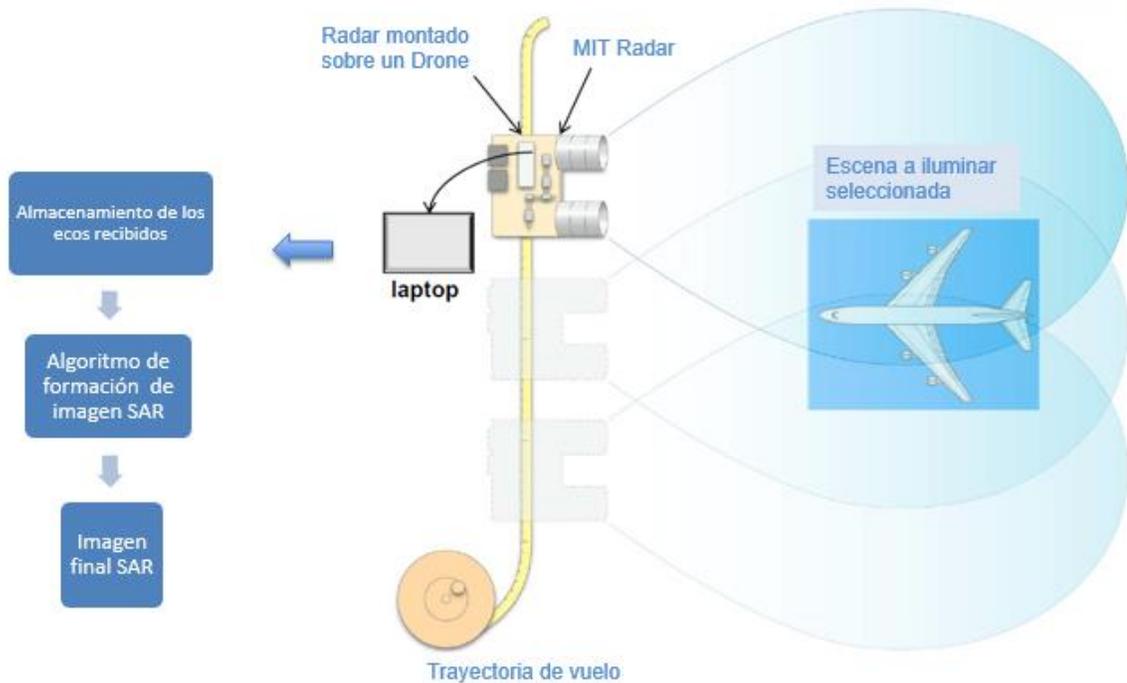


Figura 1-3: En primer lugar, el radar es montado sobre un dron, este recorre una trayectoria de vuelo y a medida que lo hace envía y recibe los ecos reflejados del objetivo, posteriormente se realiza el procesamiento de los datos, obteniendo la imagen final SAR.

## 1.2 Geometría del Radar de Apertura Sintética

La teoría básica de la geometría de los radares SAR, es la misma que para todos los radares de vista lateral SLAR. La Figura 1-4 representa la geometría de observación, con el escenario, el movimiento de la plataforma-radar, los diferentes conceptos y parámetros involucrados.

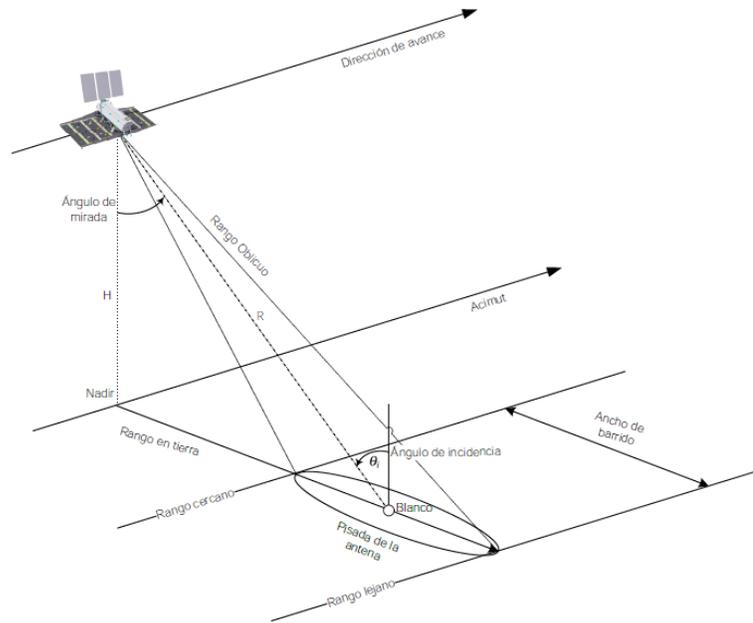


Figura 1-4: Vista general de la geometría de un SAR [20].

- Blanco o *target*: punto que se quiere detectar. Por simplicidad se usa el punto del blanco para los cálculos, pero en realidad se captura información de todo el entorno.
- Acimut o *cross-range*: es una de las dimensiones principales de los sistemas SAR, la cual corresponde a la dirección alineada con el vector velocidad de la plataforma.
- Nadir: punto de la superficie de la Tierra situada directamente debajo del sensor SAR. El recorrido de este punto encima de la Tierra con el movimiento del sensor o plataforma define la trayectoria del radar.
- Distancia o rango: cuando se habla de este concepto existe una pequeña ambigüedad, por lo que se ha dividido en dos definiciones (ver Figura 1-4):
  - Rango oblicuo o *Slant Range*: distancia directa entre el sensor y el blanco.
  - Rango en tierra o *Ground Range*: distancia sobre el terreno proyectada en la dirección de observación.
- Ancho de barrido o *swath*: corresponde a la franja que es capaz de ver el SAR en la dirección perpendicular de vuelo. Es el ancho de la imagen en la dirección de las distancias en tierra, que comprende desde el rango cercano al rango lejano, normalmente determinadas por las especificaciones del sistema.
- Ancho de haz o *beamwidth*: es el ancho del diagrama de radiación de la antena. En las aplicaciones SAR son considerados el ancho del haz en elevación y en acimut.
- Pisada de la antena: es la proyección del diagrama de la antena sobre la Tierra para un pulso electromagnético concreto. La posición y la forma vienen determinados por el haz de la antena y la geometría de la tierra.
- Ángulo de incidencia: es el ángulo en elevación que se relaciona directamente con el *swath*, estableciendo los valores extremos de los ángulos de visión y, por lo tanto, las desviaciones del máximo de radiación de la antena.
- Ángulo de mirada: es aquel localizado entre el *Slant Range* y el nadir.

### 1.3 Descripción del radar LFM-CW del MIT

El diagrama de bloques del radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia LFM-CW (por sus siglas en inglés Linear-Frequency-Modulated Continuous-Wave) del MIT, se analizará a continuación [21], [22].

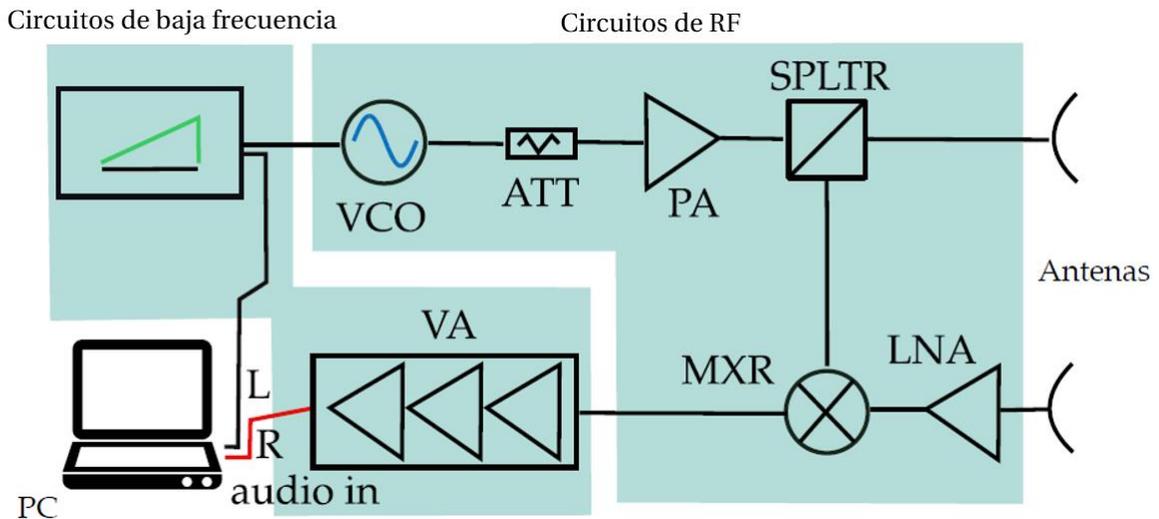


Figura 1-5: Diagrama de bloques del radar del MIT y sub-sistemas que lo componen [19].

El radar LFM-CW de la Figura 1-5 consta de cinco sub-sistemas:

- **Sub-sistemas de antenas**, para obtener un elevado aislamiento entre la etapa emisora y receptora, el radar utiliza dos antenas separadas en configuración biestática, es decir, una antena para transmisión y otra antena para recepción, siendo el cálculo entre la antena y el blanco distinto para cada antena. Pero en este caso, las antenas del radar puede considerarse casi monoestática ya que la distancia entre ellas es tan pequeña que el cálculo de las distancias de cada antena con el blanco es prácticamente igual numéricamente.
- **Sub-sistemas de circuitos RF**, el cual consiste en un oscilador controlado por voltaje (VCO, por sus siglas en inglés “*Voltage Controlled Oscillator*”), un atenuador (ATT), un amplificador de potencia (PA, por sus siglas en inglés “*Power Amplifier*”), un divisor de potencia (SPLTR), un amplificador de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés “*Low Noise Amplifier*”) y un mezclador (MXR) [19]. Para mayor comodidad en algunas ocasiones estos elementos serán nombrados por sus siglas en inglés en este documento.
- **Sub-sistema de baja frecuencia**, el cual consiste en un circuito modulador cuyo corazón es un circuito integrado generador de funciones XR-2206 [23] y un filtro de video activo (VA, por sus siglas en inglés “*Video Amplifier*”) cuyo corazón es el circuito integrado amplificador operacional de precisión cuádruple MAX414 [24].

- **Sub-sistema PC**, consiste en un computador portátil, este sub-sistema también puede estar formado por un sistema de grabación de sonidos externos y el PC para aplicaciones en que primero se desee grabar la señal proveniente del filtro de video activo y luego hacer un post procesamiento en un PC portátil.
- **Sub-sistema de energía**, consta de 8 pilas AA y el regulador de voltaje LM2490C [25], permitiendo obtener los voltajes de 5 [V] y 12[V] necesarios para cada uno de los componentes del circuito del radar.

## 1.4 Señales de interés del radar y principio de funcionamiento

En la Figura 1-6 se muestran las señales de interés del radar.

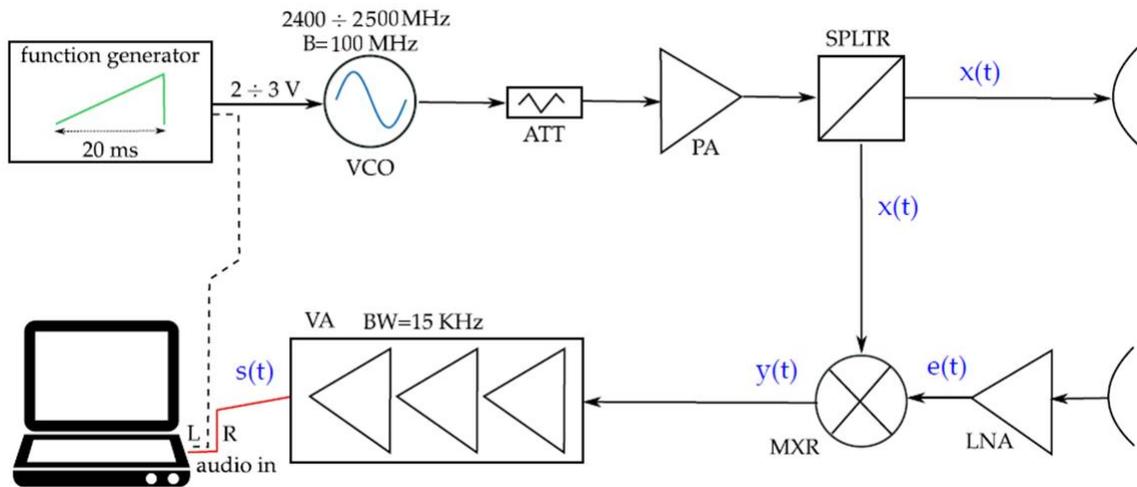


Figura 1-6: Diagrama de bloques del radar del MIT y sus señales de interés [19].

El generador de funciones alimenta al VCO con una señal diente de sierra que dura  $\tau = 20[ms]$  y que realiza una excursión de voltaje que va desde aproximadamente 2 a 3 voltios. Esta señal diente de sierra es la señal moduladora del radar.

El VCO, como consecuencia de dicho estímulo, produce en su salida una señal de radio frecuencia, del tipo “chirp”, la cual es una señal que varía su frecuencia instantánea linealmente con el tiempo, lo que permite aumentar el ancho de banda sin modificar la duración del pulso [20]. Esta frecuencia varía linealmente desde los 2400 [MHz] a 2500 [MHz]. La expresión matemática de esta señal “chirp” ( $x(t)$  en la Figura 1-6) es la siguiente [19]:

$$x(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t + cr\pi t^2) \quad (1-2)$$

donde  $f_0$  es la frecuencia inicial que vale  $f_0 = 2,400$  [GHz],  $cr$  es el “chirp rate” que equivale a  $cr = B/\tau = 5$  [GHz/s], donde  $B$  es el ancho de banda con un valor de  $B = 100$  [MHz]. La frecuencia central de este radar corresponde a  $f_c = 2,45$  [GHz]. En la Figura 1-7 se muestra la apariencia gráfica de la señal  $x(t)$  junto a la señal equivalente de un radar pulsado.

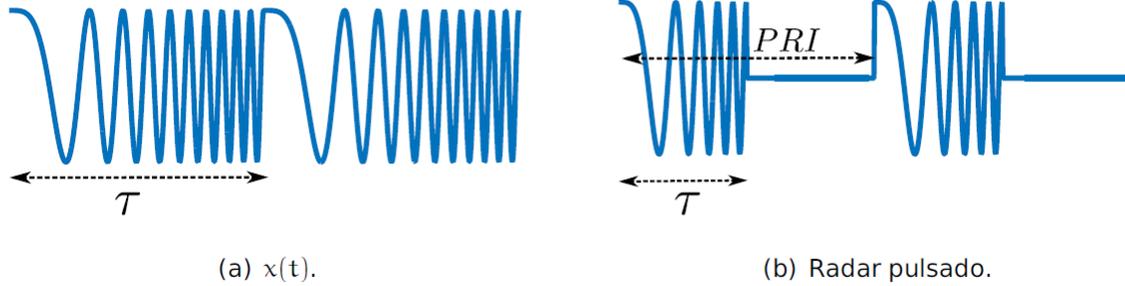


Figura 1-7: Apariencia gráfica de las señales transmitidas por (a) un radar de onda continua con modulación lineal de frecuencia, y (b) un radar pulsado con el mismo esquema de modulación [19].

En el radar pulsado se transmite un pulso “chirp” de duración  $\tau$  por cada intervalo de repetición de los pulsos PRI segundos. En el radar de onda continua, la duración del pulso “chirp” coincide con el intervalo de repetición de los pulsos PRI.

La señal de RF  $x(t)$  proveniente del VCO pasa por las siguientes etapas (ver Figura 1-6):

1. La señal  $x(t)$  es ligeramente atenuada por el ATT para no saturar la entrada del amplificador de potencia PA.
2. Luego, El PA amplifica idealmente la señal  $x(t)$  sin modificar la apariencia de la señal.
3. La salida del PA se conecta al divisor SPLTR que bifurca la señal  $x(t)$  en dirección de la antena transmisora y en dirección del mezclador, reduciendo su potencia idealmente a la mitad.
4. La antena transmisora, por su parte, irradia la señal  $x(t)$  al espacio libre de acuerdo a su patrón de radiación.
5. La parte restante de la señal sale del SPLTR e ingresa al puerto de oscilación (LO) del mezclador MXR, cuya entrada de RF es alimentada por la antena receptora del radar, la que recibe la señal del eco reflejado del blanco. La señal  $e(t)$  recibida por la antena receptora es amplificada por el LNA y luego es suministrada al mezclador.

La frecuencia instantánea de  $x(t)$  varía linealmente con el tiempo de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} (2\pi f_0 t + c r \pi t^2) = f_0 + c r t \quad (1-3)$$

Si suponemos, por simplicidad del análisis, de que en la escena de radar solo se encuentra un blanco puntual a una distancia  $r$  (ver Figura 1-9), dicha señal recibida será una versión atenuada y retardada de  $x(t)$  contaminada de ruido  $n(t)$ , el cual supondremos Gaussiano blanco. En la Figura 1-8 se muestra, en rojo, la apariencia gráfica del eco recibido  $e(t)$  [19].

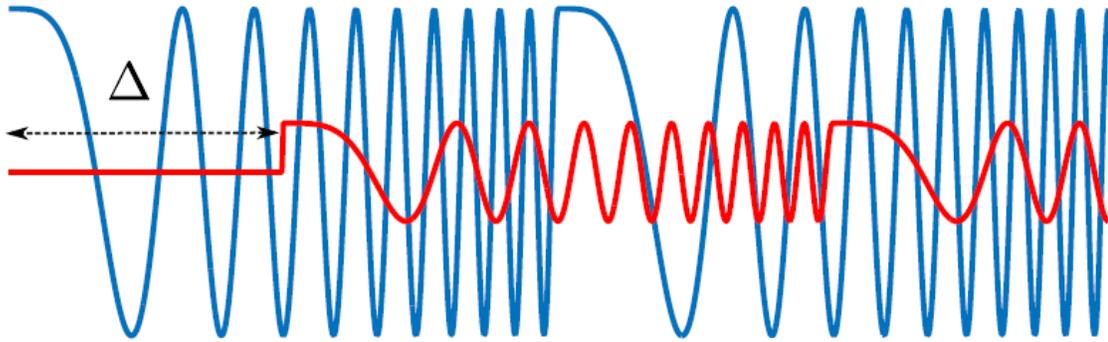


Figura 1-8: Apariencia gráfica del eco recibido  $e(t)$ , en rojo, junto a la señal  $x(t)$  transmitida, en azul, sin incluir el ruido  $n(t)$  [19].

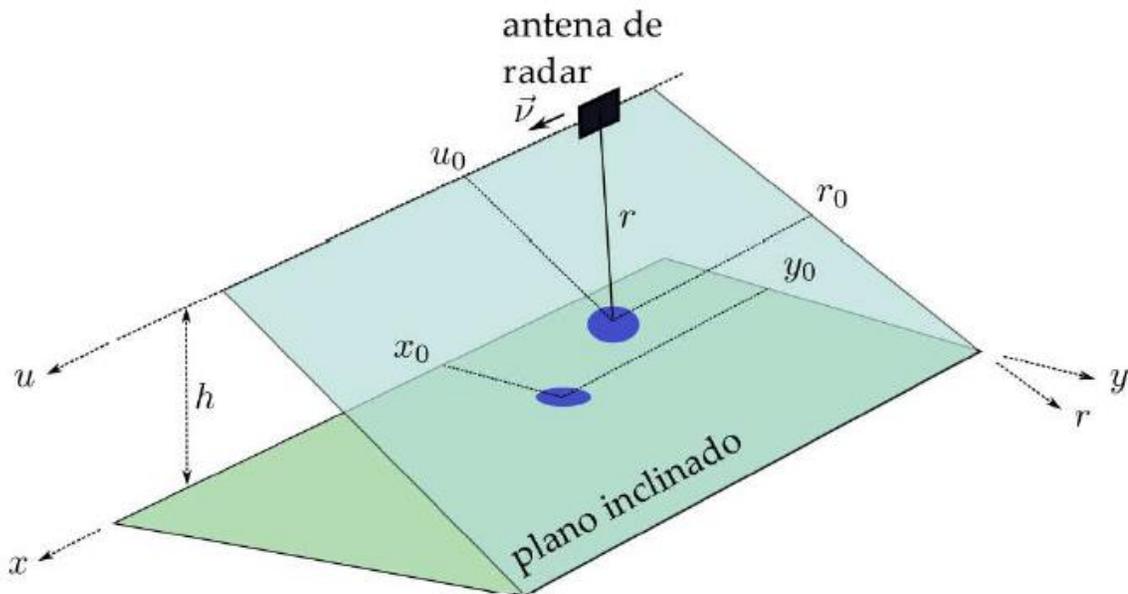


Figura 1-9: Escena del radar en la que se distingue un único blanco puntual. El blanco puntual está ubicado en  $(x_0, y_0)$  sobre el terreno, y en  $(u_0, r_0)$  sobre el plano inclinado. El radar, aerotransportado, se desplaza a una velocidad  $v$  a lo largo del eje  $u$ , a una altura  $h$  sobre el terreno [19].

La señal  $e(t)$  recibida por la antena receptora y amplificada por el LNA (ver Figura 1-6) que es suministrada al mezclador tiene la siguiente formulación matemática [19]:

$$e(t) = \alpha \cdot A \cos[2\pi f_0(t - \Delta) + cr\pi(t - \Delta)^2] + n(t) \quad (1-4)$$

donde  $\Delta$  es el retardo que sufre la señal  $x(t)$  en ir y venir hasta y desde el blanco puntual, y vale  $\Delta = 2r/c$ , siendo  $c = 3 \times 10^8$  [m/s] la velocidad de las ondas electromagnéticas en el espacio libre,  $\alpha$  es la atenuación, la cual se rige fundamentalmente por la ecuación del radar (ver ecuación(2-3)) y la ganancia del amplificador de bajo ruido, y  $n(t)$  es ruido aditivo blanco. En la Figura 1-10 se muestra, en rojo, la evolución temporal de la frecuencia instantánea de  $e(t)$  en comparación con la de  $x(t)$ , sin incluir el ruido  $n(t)$ .

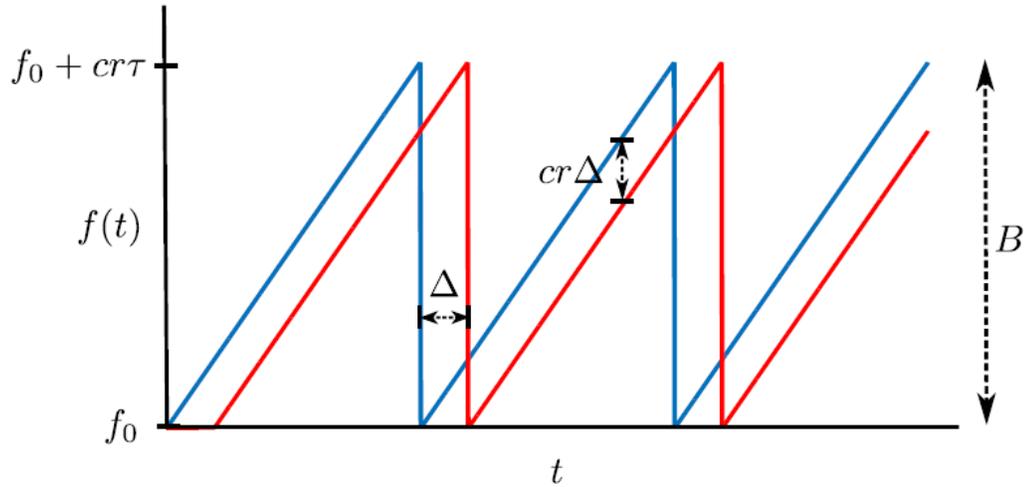


Figura 1-10: Comportamiento temporal de la frecuencia instantánea  $f(t)$  de  $x(t)$  (en azul) y del eco recibido  $e(t)$  (en rojo) [19].

La salida del MXR consiste de la mezcla de las señales  $x(t)$  y  $e(t)$ , y tiene la siguiente forma matemática [19]:

$$y(t) = x(t) \cdot e(t)$$

$$y(t) = B \cdot \cos[2\pi(2f_0)t + 2\pi cr t^2 - 2\pi cr \Delta t - \phi] + B \cdot \cos[2\pi(cr\Delta)t + \phi] + n(t) \quad (1-5)$$

donde  $\phi = 2\pi f_0 \Delta - cr\pi \Delta^2$ . El término  $cr\pi \Delta^2$  es denominado comúnmente fase residual de video, abreviado RVP, por sus siglas en inglés. El RVP es usualmente despreciable, de no ser así se le corrige [26]. La señal a la salida del mezclador, como puede apreciarse en la ecuación (1-5) se compone de una señal de alta frecuencia del orden de  $2f_0 = 4,8$  [GHz], y de una señal de frecuencia intermedia  $cr\Delta$  en Hertz, cuyo rango de frecuencia depende de los valores mínimo y máximo de  $\Delta$ . Esta señal que se encuentra a la salida del mezclador alimenta el filtro de video, cuyo ancho de banda es de 0 a 15 [kHz].

La señal a la salida del filtro de video tiene la siguiente forma [19]:

$$s(t) = C \cdot \cos[2\pi(cr\Delta)t + \phi] + n(t) \quad (1-6)$$

donde el ruido  $n(t)$  de toda la cadena de recepción viene determinado por el ancho de banda equivalente de ruido  $B_N \approx 15$  [kHz]. En la Figura 1-11 se muestra la apariencia gráfica de la señal  $s(t)$  que corresponde a la salida del filtro de video (ver Figura 1-6), en rojo, junto con la señal  $x(t)$  transmitida. De acuerdo a la ecuación (1-6), y según puede apreciarse en la Figura 1-11, la señal a la salida del filtro de video es una señal senoidal pura de frecuencia par a  $cr\Delta$ . El proceso de mezclar la señal recibida por el radar con una réplica de la señal transmitida se conoce como “*analog dechirping*”, o “*analog deramping*”, ya que la señal de frecuencia intermedia obtenida  $s(t)$  queda liberada de modulación lineal de frecuencia. Finalmente, la señal  $s(t)$  junto con cierta señal de sincronismo proveniente del modulador, ingresan como canales derecho e izquierdo por

la entrada de audio al PC o al sistema de grabación de la señal. En el PC, ambas señales son registradas en un archivo .wav para su posterior procesamiento.

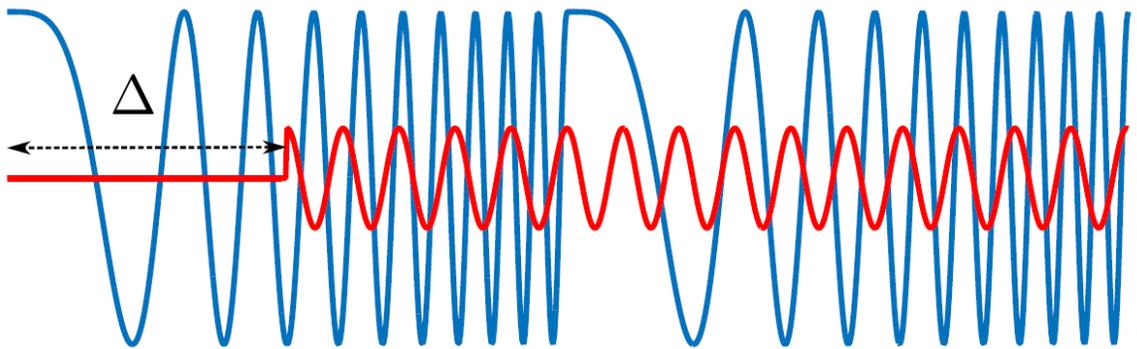


Figura 1-11: Apariencia de la señal  $s(t)$  a la salida del filtro de video, en rojo, junto con la señal  $x(t)$  transmitida, en azul, sin incluir el ruido  $n(t)$  [19].

## **2 Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW**

En este capítulo se presentan los análisis de la potencia del radar, específicamente de la cadena de RF, tanto interno como de espacio libre, el balance de potencia DC y, finalmente, se estiman los parámetros de desempeño del radar tanto para el radar LFM-CW del MIT en bruto como con las mejoras aplicadas.

### **2.1 Inventario de los principales componentes y balance de potencia DC del radar**

Los componentes circuitales del radar son muchos, entre ellos hay un gran número de resistencias y capacitores. Descartando los anteriores y otros componentes menores, a continuación se hará un breve inventario de los componentes más importantes.

El corazón del modulador, como se nombró anteriormente es el generador monolítico de funciones XR-2206 de “EXAR Corporation”, cuya hoja de especificaciones se puede encontrar en [23]. Todos los componentes de la cadena de RF son dispositivos fabricados por la empresa “Mini-Circuits”. Cada uno de estos componentes se encuentran en la Tabla 2-1, donde se indican sus modelos y una breve descripción del componente. El corazón del filtro de video es el amplificador de propósitos generales MAX414CPD+ de “Maxim Integrated”. La hoja de especificaciones se puede encontrar en [24].

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

Tabla 2-1: Modelos de los dispositivos utilizados en la cadena de RF

Componente	Número de modelo
Oscilador controlado por voltaje (VCO) [27]	ZX95-2536C+
Atenuador (ATT) [28]	VAT-3
Amplificador de potencia (PA) [29]	ZX60-272LN-S+
Divisor de potencia (SPLTR) [30]	ZX10-2-42+
Amplificador de bajo ruido (LNA) [29]	ZX60-272LN+
Mezclador [31]	ZX05-43MH+

En base a las hojas de especificaciones de los componentes de la Tabla 2-1 y de las hojas de especificaciones del modulador [23] y filtro de video [24] se hizo un balance de los consumos de corrientes máximas de cada componente activo para saber qué tan bueno es el rendimiento del radar en base a su consumo de corriente.

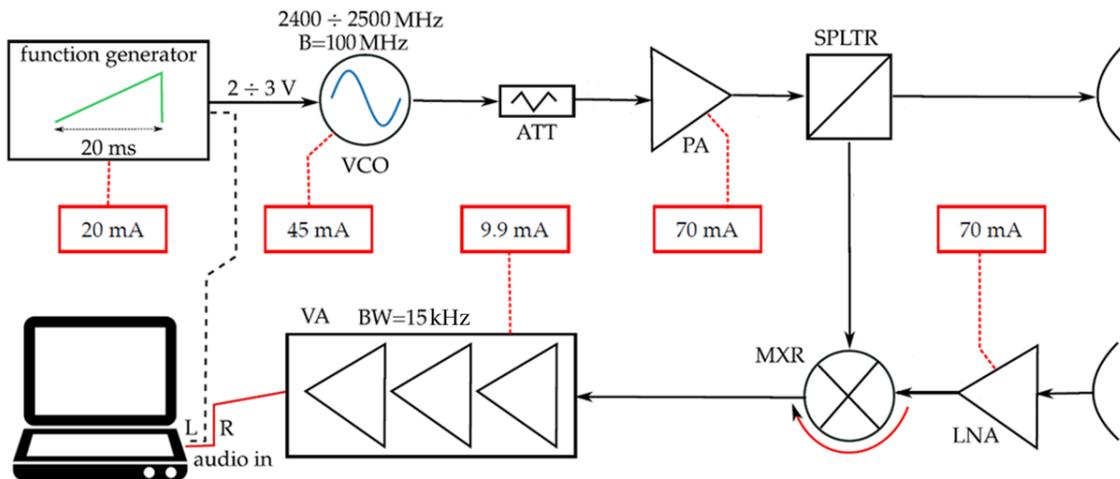


Figura 2-1: Corrientes máximas de alimentación de cada componente activo del radar [19].

Ordenando los valores de corrientes indicados en la Figura 2-1 en la Tabla 2-2 se realiza una estimación de la corriente máxima global que deberá suministrar el sistema de alimentación [19].

Tabla 2-2: Corriente máxima de alimentación de cada componente activo del radar.

Componente	I <sub>max</sub>
Generador de funciones	20 [mA]
Amplificador de video	9,9 [mA]
VCO	45 [mA]
PA	70 [mA]
LNA	70 [mA]
<b>Total</b>	<b>214,9 [mA]</b>

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

A partir del valor de corriente total calculado en la Tabla 2-2 y tomando en cuenta que la capacidad nominal estándar de una batería alcalina AA es de unos 2000[mAh], se estima que el radar tenga una autonomía de seis horas y media [19].

$$Autonomía \approx 0.7 \cdot \frac{2000[mAh]}{215[mA]} \approx 6,5 [h] \quad (2-1)$$

Si se considera que el radar estará en constante funcionamiento, la autonomía del sistema debería ser suficiente para trayectorias que sean de una distancia media a corta, en cambio para trayectorias largas dependerá exclusivamente de la configuración que se le dé al radar respecto al tiempo de envío y recepción de los ecos reflejados.

### 2.2 Antenas

En este sub-capítulo, que corresponde al sub-sistema de antenas del radar, es donde se le aplicará la principal modificación al sistema. En primer lugar se analizará las características de la antena utilizada por el MIT y a continuación se presentará la antena diseñada para el sistema y las mejoras que aporta a este.

Las antenas originales del radar del MIT consiste en un par de contenedores de tarros de café cilíndricos cuya geometría se muestra en la Figura 2-2.

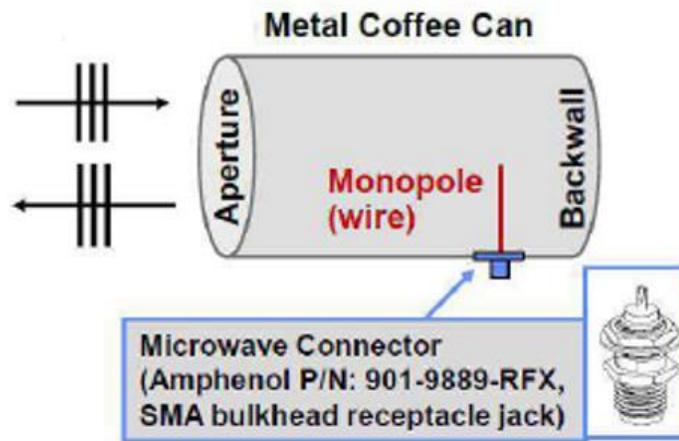


Figura 2-2: Apariencia geométrica de las antenas cilíndricas del radar MIT [19].

Los parámetros de desempeño de estas antenas se muestran en la Tabla 2-3 que fueron extraídos de [19].

Si bien, estos tarros de café empleados por el MIT para el envío y recepción de las señales de los ecos reflejados, no son específicamente antenas, su funcionamiento es bastante bueno basándonos en los parámetros presentados en la Tabla 2-3, pero indudablemente se puede lograr algo mucho mejor y con mejores resultados, es decir, una antena con mayor ganancia, más directiva y con un ancho de banda mayor, parámetros que son fundamentales para un óptimo funcionamiento para este tipo de radar.

## **Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW**

Para este proyecto se diseñaron antenas impresas del tipo Yagi, las cuales por sus características y su diseño deberían proporcionar parámetros de desempeño mucho mejores tanto en ganancia, directividad y ancho de banda. El diseño de esta antena y sus parámetros serán tratados con mayor profundidad en el siguiente sub-capítulo.

Tabla 2-3: Parámetros de desempeño de las antenas de lata del radar del MIT [19].

Parámetro	Valor
Ganancia	5,06 [dB]
Ancho de haz vertical	70°
Ancho de banda (-10 dB)	>100 [MHz]

### **2.2.1 Diseño de antenas impresas tipo Yagi**

Para este proyecto, como se presentó anteriormente, se diseñaron antenas impresa tipo Yagi. Este tipo de antenas son altamente directiva y su costo de diseño es bastante bajo, por lo cual son una excelente elección en cuanto a las características que se buscan para este sistema.

El esquema de la antena se muestra en la Figura 2-3. La alimentación de la misma se realiza mediante una línea de transmisión paralela tipo Microstrip, situada en ambas caras del sustrato y con impedancia característica de 50 [Ohm]. Al final de la línea de alimentación se encuentra el dipolo, con uno de los brazos impreso en la parte superior del sustrato mientras que el otro brazo se sitúa en la cara inferior. Esta configuración ha sido propuesta por [32].

Con esta alimentación de la antena se consigue la correcta excitación en fase del dipolo (cada uno de los brazos desfasados en 180°) sin necesidad de incluir elementos externos, lo que reduce considerablemente el tamaño final de la antena [33].

Además del dipolo impreso, y siguiendo la estructura de las antenas Yagi tradicionales, en la estructura de la antena se incluye un plano de masa truncado, situado en la cara inferior del sustrato que actúa como elemento reflector de la antena, y una serie de elementos directores de iguales dimensiones y equiespaciados entre sí [33].

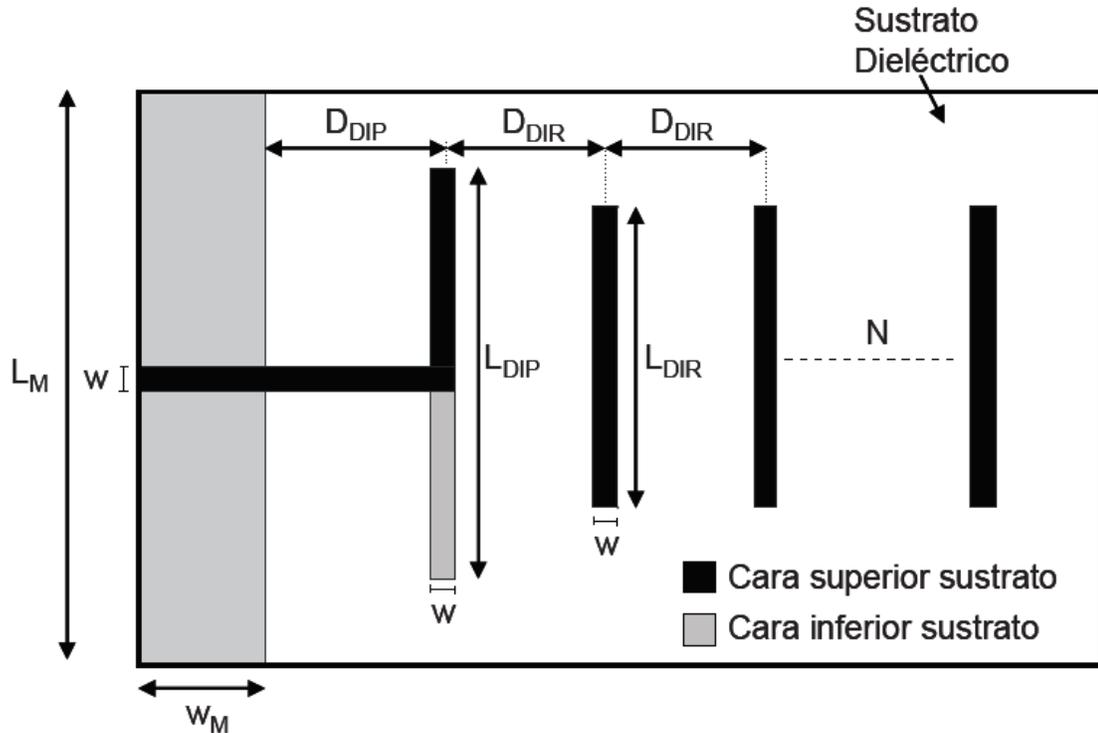


Figura 2-3: Esquema funcional de la antena impresa tipo Yagi diseñada [33].

El diseño de la antena fue diseñada en la banda ISM, frecuencias que van entre 2,4 [GHz] y los 2,5 [GHz] con una frecuencia central de  $f_c = 2,45$  [GHz], que es precisamente el ancho banda y la frecuencia central en la cual trabaja el radar fabricado para este proyecto, que tiene como base el radar diseñado por el MIT.

El diseño de esta antena se llevó a cabo utilizando el programa computacional “Ansys HFSS”. En el cual se realizó un análisis sistemático de cada una de las dimensiones de la antena y su influencia en las características de la misma, tanto en reflexión como en radiación, eligiendo en cada caso la dimensión que maximice la ganancia de la antena, sin empeorar su comportamiento frecuencial.

El primer paso fue seleccionar el sustrato a utilizar, para ello se seleccionó el sustrato FR4\_epoxi el cual es comúnmente empleado por las empresas que fabrican placas de cobre para circuitos impresos, este sustrato tiene una permitividad relativa de  $\epsilon_r = 4.4$  [-], una vez ya seleccionado el sustrato, se continuó con la optimización de las dimensiones del reflector de la antena, luego con las dimensiones del dipolo y por último con las dimensiones de los directores. Los cuales en primera instancia, se comenzó agregando solo un elemento director y posteriormente se le fueron añadiendo más elementos para aumentar su ganancia y a la vez su direccionalidad. En la Tabla 2-4 se puede ver el resumen de las medidas óptimas utilizadas para el diseño de las antenas de este proyecto.

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

Tabla 2-4: Medidas finales de la antena impresa tipo Yagi para bandas ISM.

Elementos de la antena	Valor
Largo reflector ( $L_M$ )	75 [mm]
Ancho reflector ( $W_M$ )	15 [mm]
Ancho de todas las líneas Microstrip ( $w$ )	3 [mm]
Distancia dipolo ( $D_{Dip}$ )	22 [mm]
Largo dipolo ( $L_{Dip}$ )	45 [mm]
Distancia director ( $D_{dir}$ )	18 [mm]
Largo director ( $L_{Dir}$ )	36 [mm]
Sustrato FR4_epoxi ( $\epsilon_r$ )	4.4[-]

En lo que respecta al costo de fabricación, se pueden ver sus valores en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Resumen de los costos de fabricación de las antenas (transmisión y recepción)

Materiales	Valor
Sustrato FR4_epoxi doble faz (200x200 mm)	\$2500
Marcador Pentel M-10	\$1000
Percloruro Ferrico	\$1500
Total	CLP(\$5000

Esta antena fue diseñada utilizando la técnica de ataque químico o mejor conocido como la técnica del marcador y Percloruro Férrico [34]. En la Figura 2-4 se puede observar la antena diseñada físicamente con las medidas de la Tabla 2-4.

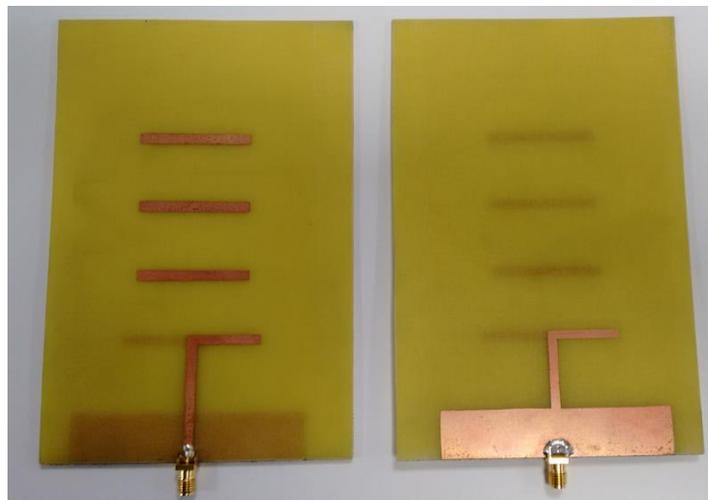


Figura 2-4: Antena impresa tipo Yagi optimizada para banda ISM.

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

En la Figura 2-5 se muestra el patrón de radiación de la antena del plano E en  $180^\circ$ , obtenido tanto en simulación, en azul, como el medido, en rojo. Esta medición fue realizada en la cámara anecoica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Se puede observar que los patrones de radiación son similares, lo que indica que al momento de llevar la simulación a un diseño real se hizo de forma correcta. A los  $60^\circ$  y  $-60^\circ$  se puede observar que el patrón de radiación, en lo que respecta a la medición realizada, difiere del patrón obtenido mediante simulación, ya que la ganancia en este punto es bastante menor a la obtenida mediante simulación, esto se debe a que los trazados de las líneas Microstrip no fueron muy precisos. Por otro lado, este factor produjo que la ganancia máxima de la antena diseñada sea mucho mayor que la obtenida mediante simulación, ya que la ganancia máxima obtenida en la medición de la antena fue de 8,224 [dB], mientras que la obtenida mediante simulación fue de 6,8 [dB]. Por lo tanto, si bien se pierde un poco la forma del patrón de radiación que se esperaba obtener, se gana en lo que respecta a la ganancia máxima de la antena en 1,424 [dB].

Otro factor importante a destacar es el ancho del haz en el plano E, este ancho fue de aproximadamente  $65^\circ$ , lo que indica que la antena diseñada es bastante directiva, la cual es una de las características que se buscaba al diseñar este tipo de antena.

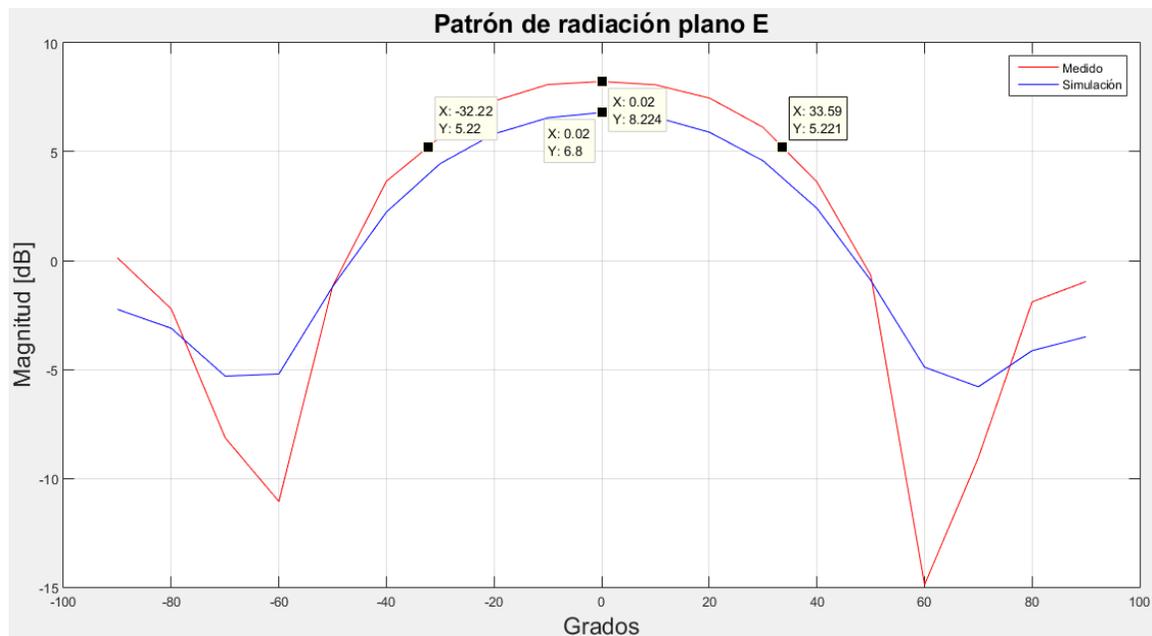


Figura 2-5: Patrón de radiación de la antena del plano E en  $180^\circ$ , en azul, se observa el patrón obtenido mediante simulación, también se puede ver su ganancia máxima de 6,8 [dB], en rojo, se observa el patrón obtenido a través de la medición de la antena en cámara anecoica, ubicada en la Universidad Técnica Federico Santa María y su ganancia máxima de 8,2 [dB], los otros dos puntos ubicados  $-3$  [dB] de la ganancia máxima indican el ancho del haz en el plano E de  $65^\circ$ .

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

Respecto a la adaptación de la antena, en la Figura 2-6, se puede apreciar que la pérdida de retorno de la antena diseñada para la banda ISM cumple con lo requerido (gráfica en rojo), es decir, las frecuencias que comprenden desde los 2,4 [GHz] hasta los 2,5 [GHz] están por debajo de los -10 [dB], que era lo esperado de acuerdo a la simulación realizada (gráfica azul) y que asegura el correcto funcionamiento de la antena para estas frecuencias. Esta medición fue realizada con la ayuda del instrumento llamado “*Vector Network Analyzer*” (Analizador de Redes Vectoriales) o mejor conocido por sus siglas en inglés como “VNA”. También se puede apreciar que las antenas poseen un gran ancho de banda para frecuencias bajo los 2,45 [GHz].

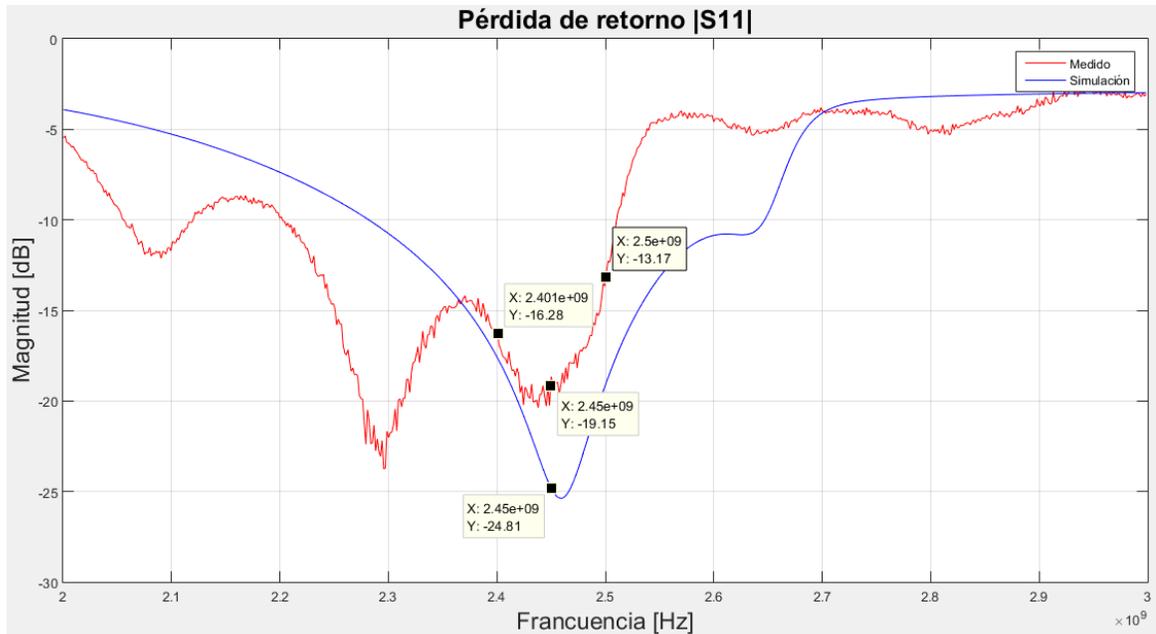


Figura 2-6: Pérdida de retorno |S11| de la antena impresa Yagi diseñada, en azul, se observa el gráfico obtenido mediante simulación y en rojo el gráfico obtenido mediante la medición de la antena a través del instrumento “*Vector Network Analyzer*”.

Finalmente los parámetros de desempeño de la antena diseñada se muestra en la Tabla 2-6 en conjunto con las antenas del MIT.

Tabla 2-6: Parámetros de desempeño de las antenas diseñadas para el radar.

Parámetro	Valor antenas diseñadas	Valor antenas MIT
Ganancia	8,2 [dB]	5,06 [dB]
Ancho de haz en el plano E	65°	70°
Ancho de banda (-10 [dB])	>200 [MHz]	>100[MHz]

Como se puede apreciar en la Tabla 2-6 la antena diseñada posee una mayor ganancia, un mayor ancho banda y es más directiva, en comparación a las antenas cilíndricas (tarros de café) anteriormente vistas, proveyendo al sistema de un mejor dispositivo para realizar la transmisión y recepción de la señal.

## 2.3 Balance de potencia interna

De las hojas de especificaciones de los distintos componentes de RF indicados en la Tabla 2-1 se han extraído los valores de potencia de salida, de ganancia y de atenuación, según el caso, los cuales se muestran en la Tabla 2-7.

En la Figura 2-7 se muestran los valores de potencia de salida (en azul), de ganancia (en verde) y de atenuación (en rojo), según sea el caso, extraídos de las hojas de especificaciones tal como se ha indicado.

En la Figura 2-7 se ha incluido el balance de potencia correspondiente a la cadena de transmisión del radar. Para resolver el balance de potencia correspondiente a la cadena de recepción se ha debido estimar, a su vez, el balance de potencia de espacio libre del radar, para lo cual en la cadena de recepción se ha incluido también el balance de potencia de recepción tanto para el radar en bruto del MIT (en azul) y para el radar con las nuevas antenas diseñadas (en naranja), este balance se desarrolla en la siguiente subsección.

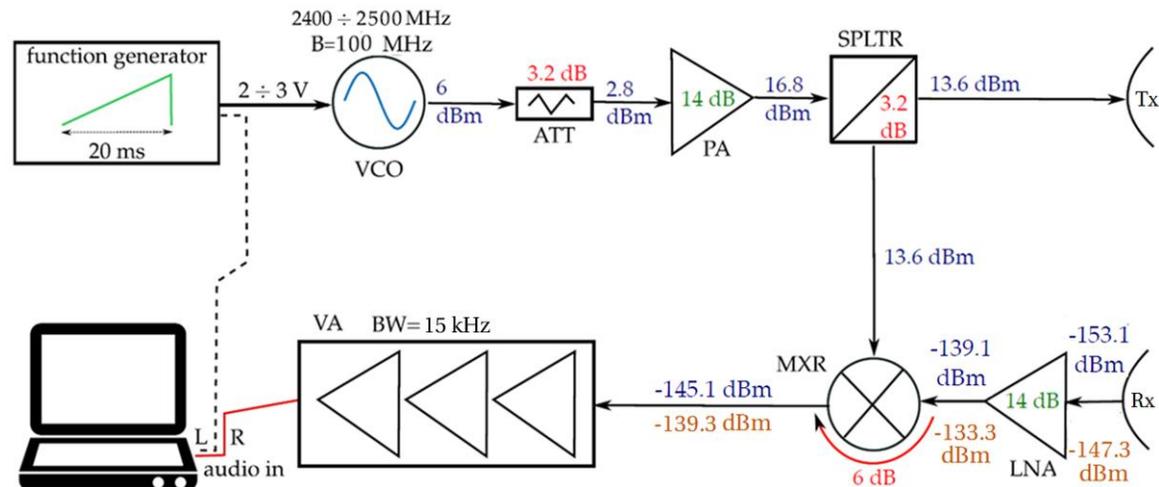


Figura 2-7: Diagrama de bloques del radar del MIT, balance de potencia interna [19].

Tabla 2-7: Valores de potencia de salida, ganancia y de atenuación, según el caso, de los dispositivos de RF extraídos de sus hojas de especificaciones.

Componente	Potencia
Oscilador controlado por voltaje (VCO) [27]	6 [dBm] (salida)
Atenuador (ATT) [28]	-3.2 [dB] (atenuación)
Amplificador de potencia (PA) [29]	14 [dB] (ganancia)
Divisor de potencia (SPLTR) [30]	-3.2 [dB] (atenuación)
Amplificador de bajo ruido (LNA) [29]	14 [dB] (ganancia)
Mezclador [31]	-6 [dB] (atenuación)

## 2.4 Balance de potencia de RF de espacio libre

Para el balance de potencia de espacio libre del radar LFM-CW, se partirá definiendo las distancias mínimas  $r_m$  y máximas  $r_M$  que se esperan sondear, y el coeficiente de retrodispersión mínimo  $\sigma_m$ , tal como se indica en la Tabla 2-8.

Las distancias mínimas y máximas se han calculado usando la siguiente formula [19]:

$$r_{m,M} = \frac{c f_{m,M}}{2c_r} \quad (2-2)$$

donde  $f_m$  y  $f_M$  son las frecuencias de corte mínima y máxima, del filtro de video, respectivamente,  $c_r$  corresponde al “chip rate” donde  $c_r = B/\tau = 5$  [GHz/s] y  $c$  la velocidad de la luz. Las frecuencias  $f_m$  y  $f_M$  se obtuvieron simulando el filtro de video en el software “Multisim 13.0”. En la Figura 2-8 se muestra el diagrama esquemático del filtro de video y en la Figura 2-9 su respuesta en frecuencia obtenida mediante simulación.

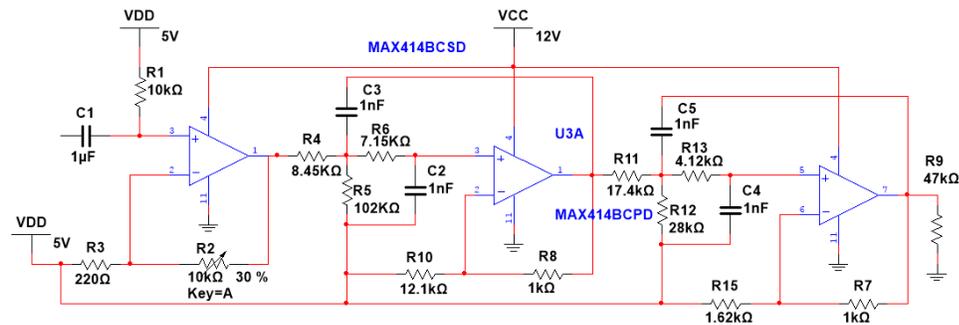


Figura 2-8: Diagrama esquemático del filtro de video.

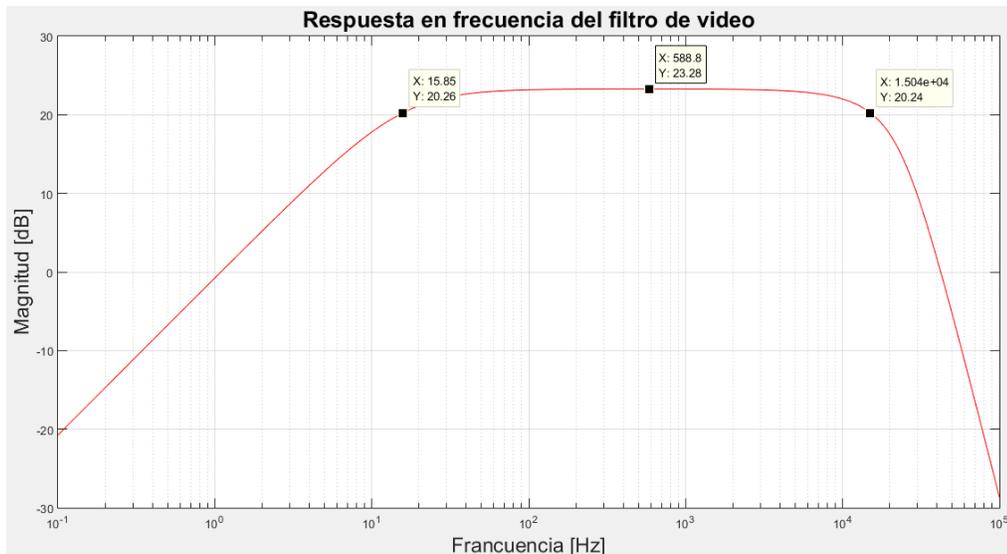


Figura 2-9: Respuesta en frecuencia del filtro de video, se observan tres puntos, el del centro, corresponde a la ganancia máxima del filtro y los otros dos restantes, corresponden a la frecuencia de corte superior e inferior del filtro a los -3 [dB] respectivamente.

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

Tabla 2-8: Parámetros iniciales para estimar el balance de potencia de RF en espacio libre del radar

Parámetro	Valor
Distancia mínima ( $r_m$ )	0.54 [m]
Distancia máxima ( $r_M$ )	450 [m]
RCS mínima ( $\sigma_m$ ) [19]	-20 [dB]

En base a la potencia  $P_{Tx}$  [dB] transmitida y según se indica en la Tabla 2-7 como en la Figura 2-7, se ha procedido a estimar la mínima potencia que se espera recibir, la cual ha de corresponder con un blanco ubicado en la distancia máxima  $r_M$  y con una RCS mínima de  $\sigma_m$ , la que se calcula de la siguiente forma:

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r_M^4} \sigma_m \quad (2-3)$$

En la Tabla 2-9 se resume este cálculo y se hace una comparación entre características del radar en bruto del MIT y el radar ya modificado, donde la potencia mínima que se espera recibir de un blanco u objetivo con una RCS mínima ( $\sigma_m$ ), ha sido calculada usando la potencia transmitida  $P_{Tx}$  de la Tabla 2-7, siendo  $\lambda$  la longitud de onda de espacio libre asociada a la frecuencia central de operación del radar  $f_c = 2.45$  [GHz] y  $G$  a la ganancia de las antenas extraídas de la Tabla 2-6, tanto para el caso del radar en bruto del MIT como para el caso del radar a fabricar. La potencia  $P_{Rx}$  se ha incorporado a la cadena de recepción del radar según se muestra en la Figura 2-7, en azul para el radar en bruto del MIT y en naranja para el radar con las antenas diseñadas.

Tabla 2-9: Estimación de la mínima potencia que se espera recibir de un blanco detectable por el radar.

Parámetro	Valores Radar con antenas Yagi	Valores Radar con antenas MIT
Potencia de transmisión ( $P_{Tx}$ )	13,6 [dBm] = 22,91 [-]	13,6 [dBm] = 22,91 [-]
Ganancia antena ( $G^2$ )	16,45 [dB]= 44,16 [-]	10,12 [dB]=10,28 [-]
Longitud de onda en $f_c$ ( $\lambda^2$ )	-18,24 [dB]=0,015 [-]	-18,24 [dB]=0,015 [-]
Factor $(4\pi)^3$	32,97 [dB]=1984,4 [-]	32,97 [dB]=1984,4 [-]
Distancia máxima ( $r_M^4$ )	106,13 [dB]=4,10 * 10 <sup>10</sup> [-]	110 [dB]=1 * 10 <sup>11</sup> [-]
RCS mínima de $\sigma_m$	-20 [dB]=0,01 [-]	-20 [dB]=0,01 [-]
Potencia mínima de recepción ( $P_{Rx}$ )	-147,3 [dBm]	-153,1 [dBm]

Como se puede ver en la Tabla 2-9 la potencia mínima de la señal en la cadena de recepción estimada con un blanco ubicado en la distancia máxima  $r_M$  y con una RCS mínima de  $\sigma_m$ , es mayor con las antenas diseñadas que con las antenas utilizadas por MIT, de esta forma logrando aumentar el balance de potencia de RF de espacio libre y a la vez el balance de potencia interna del radar y por ende mejorando la adquisición de datos por parte del radar.

## 2.5 Estimación de los parámetros de desempeño del radar

El desempeño del radar analizado utilizando las antenas diseñadas para la generación de imágenes será establecido a través de los valores estimados de los siguientes parámetros: el alcance  $r_M$ , el coeficiente de retrodispersión equivalente al ruido  $\sigma_{NE}^0$ , la resolución en distancia  $\delta_R$  y la resolución en acimut  $\delta_A$ .

El alcance  $r_M$  del radar fue estimado anteriormente con  $f_M \approx 15[kHz]$ , obteniendo:

$$r_M = 450 [m]$$

El coeficiente de retrodispersión equivalente de ruido se obtiene igualando a uno la ecuación (2-4).

$$SNR_0 = \frac{P_{Rx}}{KT_0 B_N F} \quad (2-4)$$

Donde  $F$  es el factor de ruido calculado en [19] para la cadena de recepción,  $P_{Rx}$  fue calculado previamente,  $K$  es la constante de Boltzmann  $K = 1.38064852 \cdot 10^{-23} [j/k]$ ,  $T_0 = 298.15 K$  [19] es la temperatura del filtro y  $B_N = 15 [kHz]$  es el ancho de banda equivalente de ruido  $B = f_M - f_m$ .

Por lo tanto el coeficiente de retrodispersión equivalente de ruido para  $r = r_M$  y despejando precisamente el valor  $\sigma_{NE}^0$  en:

$$\sigma_{NE}^0 = \frac{P_{Rx} (4\pi)^3 r_M^4 K T_0 B_N F}{P_{Tx} G^2 \lambda^2} \quad (2-5)$$

Sustituyendo en la ecuación (2-5) los valores correspondientes, se obtiene:

$$\sigma_{NE}^0 = -33,6 [dBm]$$

Las resoluciones  $\delta_R$  y  $\delta_A$  se pueden aproximar por las distancias del primer cruce por cero de las funciones sinc de la ecuación (2-6) [19]:

$$imagen(r, u) \approx \tau_r \text{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (r - r_0) \right] \frac{2\Delta\theta_H}{\lambda_0} \text{sinc} \left[ \frac{2\Delta\theta_H}{\lambda_0} (u - u_0) \right] \quad (2-6)$$

En base a [19] la ecuación (2-6), se puede aproximar de la siguiente forma:

$$\delta_R = \frac{c}{2B} \quad (2-7)$$

$$\delta_A = \frac{\lambda_0}{2\Delta\theta} \quad (2-8)$$

En efecto, al sustituir en dichas ecuaciones los valores de las distintas variables, se obtienen:  $\delta_R = 1,5 [m]$  y  $\delta_A = 0,057 [m]$ .

## Análisis de la potencia y estimaciones de los parámetros de desempeño del radar LFM-CW

A continuación en la Tabla 2-10 se presenta un resumen de los parámetros más importantes del radar LFM-CW con las antenas diseñadas.

Tabla 2-10: Resumen de los principales parámetros del radar LFM-CW con las antenas diseñadas.

Parámetro	Valor
Distancia máxima ( $r_M$ )	450 [m]
Distancia mínima ( $r_m$ )	0.54 [m]
Resolución rango ( $\delta_R$ )	1,5 [m]
Resolución acimut ( $\delta_A$ )	0,057 [m]
Autonomía de energía eléctrica	$\approx 6,5$ [h]
Coefficiente de retrodispersión equivalente al ruido ( $\sigma_{NE}^0$ )	-33,6 [dBm]
Potencia de transmisión ( $P_{Tx}$ )	13,6 [dBm]
Potencia mínima de recepción ( $P_{Rx}$ )	-147,3 [dBm]
Ganancia antenas ( $G$ )	8,2 [dB]

## 3 Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

Como fue explicado anteriormente, un sistema SAR, se divide en dos grandes procesos, el primero de ellos es la adquisición y preparación de la señal y el segundo corresponde al procesamiento de la señal, en el cual se convierten los datos crudos provenientes de la primera etapa a una imagen de fácil interpretación a través de un algoritmo de focalización.

En primer lugar se dará a conocer el diseño físico del sistema fabricado para la generación de imágenes, luego el algoritmo utilizado para procesar los datos, a continuación se explicará la metodología que se utilizó para la toma de imágenes y por último los resultados.

### 3.1 Sistema fabricado basado en el radar LFM-CW del MIT

Como se puede ver en la Figura 1-5 el radar consiste principalmente de 5 sub-sistemas, el sub-sistema de antenas, el sub-sistema de circuitos RF, el sub-sistema de baja frecuencia (filtro de video y modulador), el sub-sistema PC y por último sub-sistema de energía.

Se tomó cada uno de estos sistemas y basándose en la circuitería y fabricación del radar diseñado por el MIT [21] se llevó a cabo la fabricación del radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia o mejor conocido como el radar LFM-CW del MIT que permitirá través de su apertura sintética generar imágenes tipo SAR.

Cabe señalar que cada uno de los circuitos impresos de este radar fue diseñado utilizando la técnica de ataque químico o mejor conocido como la técnica del marcador y Percloruro Férrico [34].

El radar LFM-CW fabricado, se puede ver en la Figura 3-1, donde se observa cada uno de los sub-sistemas claramente definidos. En primer lugar se tiene el sub-sistema de baja frecuencia en el recuadro rojo, en la parte superior de este cuadro se encuentra el circuito modulador, donde se puede apreciar el circuito integrado generador de funciones XR2206 y los componentes que lo acompañan, este circuito es el encargado de generar la señal moduladora del radar y la señal de sincronismo de este mismo. Esta señal de sincronismo corresponde a un tren de pulsos rectangulares que posee el mismo periodo que la señal moduladora (ver Figura 3-27), como se

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

explica en el sub-capítulo 1.4, esta señal es utilizada en el procesamiento de la señal y se conecta al canal izquierdo del sub-sistema PC a través de un cable de audio, en la Figura 3-2 se puede ver el circuito esquemático y en la Figura 3-3 el circuito real utilizado.

En parte inferior del recuadro rojo se encuentra el filtro de video, en particular el amplificador operacional MAX414 y sus componentes, el cual es el encargado de filtrar la señal proveniente del mezclador, como se explica en la subsección 1.4, esta señal al igual que la señal de sincronismo del modulador ingresa a la tarjeta de audio del sub-sistema PC pero en este caso a través del canal derecho. En la Figura 3-4 se puede ver el circuito esquemático y en la Figura 3-5 el circuito real utilizado.

En el recuadro verde se encuentra el sub-sistema de circuitos RF (Figura 3-6), en primer lugar a la izquierda se tiene el Oscilador controlado por voltaje (ZX95-2536C-S+), seguido por el atenuador de 3 [dB] (VAT-3), a continuación el amplificador de potencia (ZX60-272N), el cual se conecta al divisor de potencia (ZX10-2-42-S+), que a su vez se conecta a través de unas de sus salidas al mezclador (ZX05-43MH-S+), el que recibe en su puerto RF la señal proveniente del amplificador de bajo ruido (ZX60-272N).

En el recuadro morado se encuentra el sub-sistema de antenas en configuración biestática, antenas que fueron explicadas con detalles en la sección 2.2.1.

En el recuadro amarillo se encuentra el sub-sistema de energía, que consta de 8 pilas AA y el regulador de voltaje LM2490C [25], lo que permite generar los voltajes de 5 [V] y 12[V] necesarios para cada uno de los componentes del circuito del radar, en la Figura 3-7 se puede ver el circuito esquemático y en la Figura 3-8 el circuito real utilizado.

El presupuesto de estos componentes y todos los anteriores se puede ver en el Apéndice A.

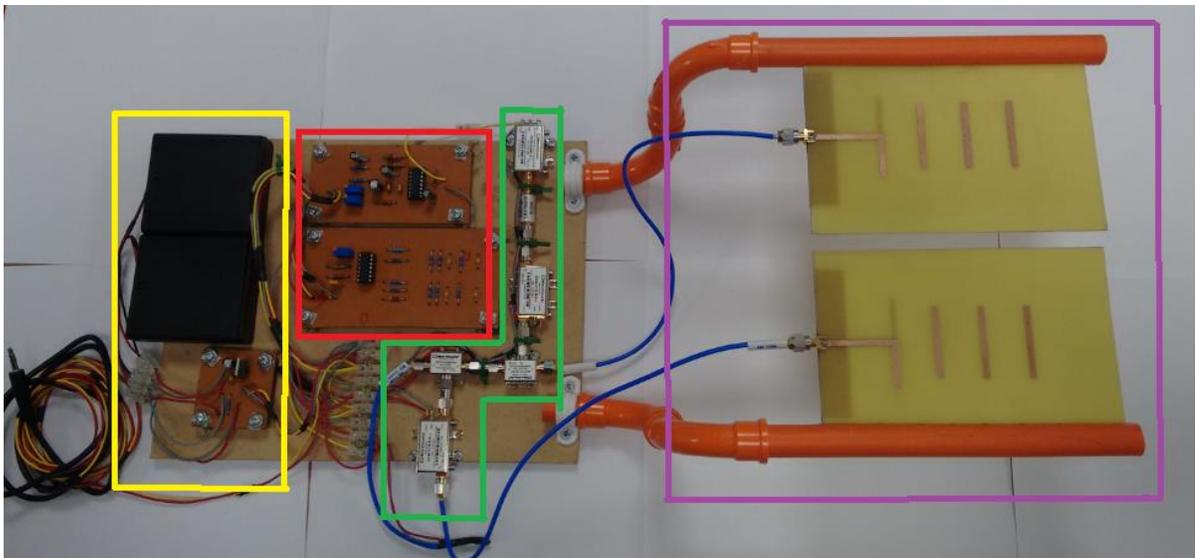


Figura 3-1: Sistema completo del radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia, en rojo el sub-sistema de baja frecuencia, en verde el sub-sistema de cadena RF, en morado el sub-sistema de antenas y en amarillo el sub-sistema de energía.

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

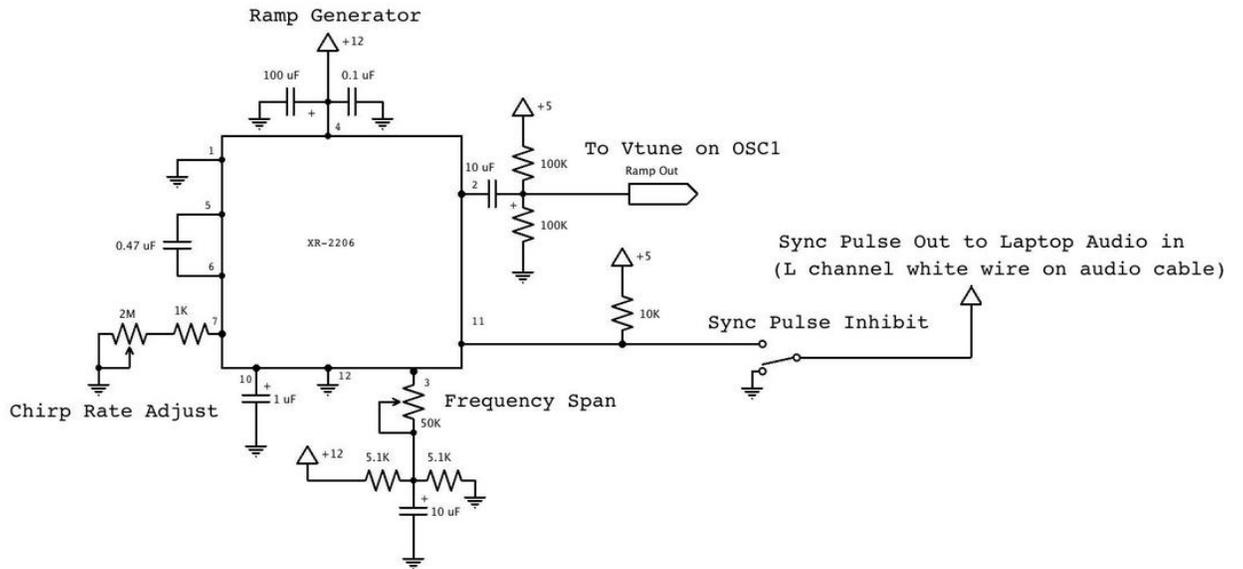


Figura 3-2: Circuito esquemático correspondiente al circuito modulador del sistema [21].

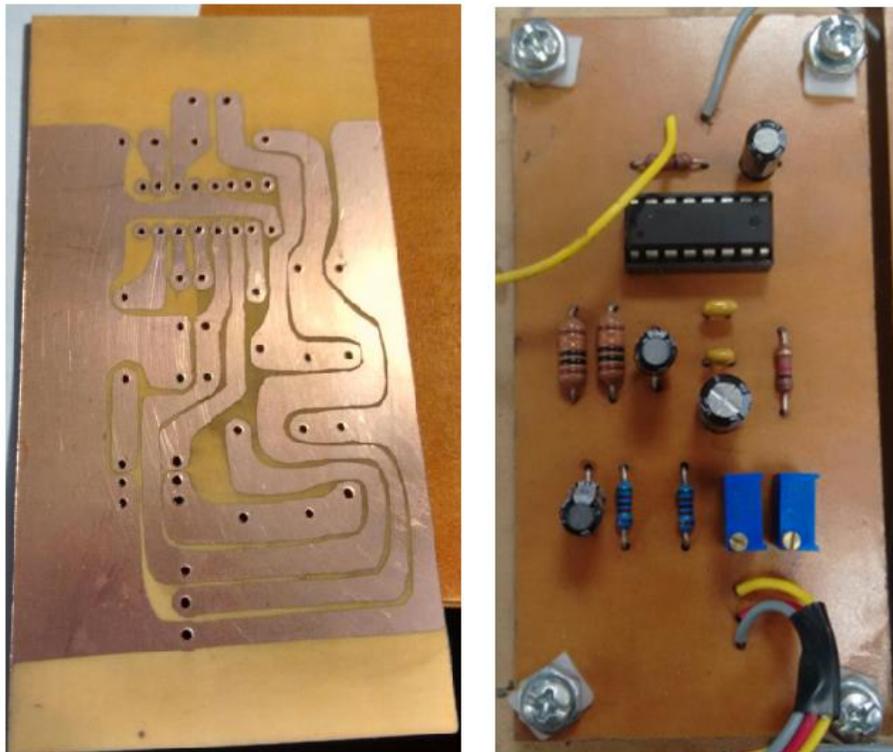


Figura 3-3: Circuito modulador utilizado en el sistema, al lado izquierdo se observa el circuito impreso diseñado y al lado derecho la vista superior del circuito modulador, cuyo principal componente consiste en un generador de funciones XR2206.

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

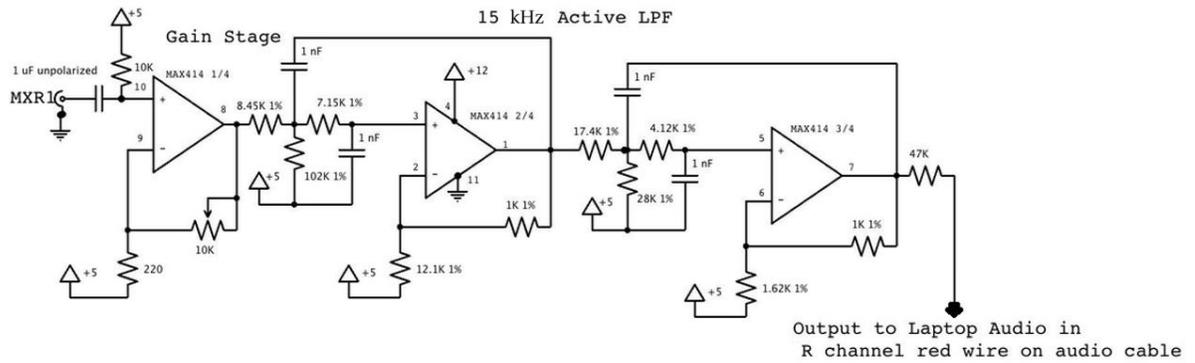


Figura 3-4: Circuito esquemático correspondiente al filtro de video del sistema [21].

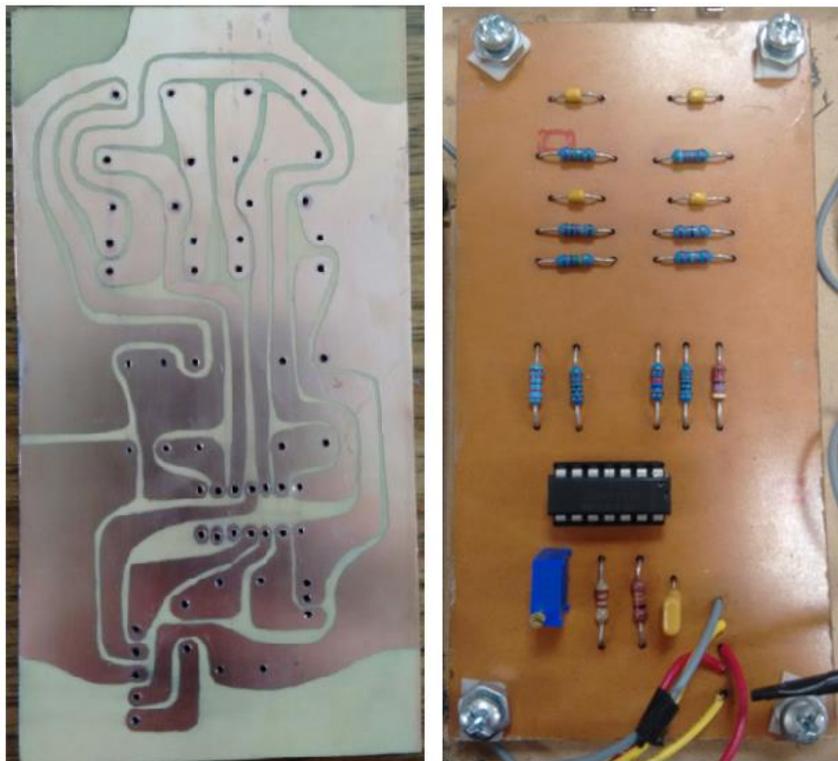


Figura 3-5: Filtro de video utilizado en el sistema, al lado izquierdo se observa el circuito impreso diseñado y al lado derecho la vista superior del circuito, cuyo principal componente es el amplificador operacional MAX414.

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

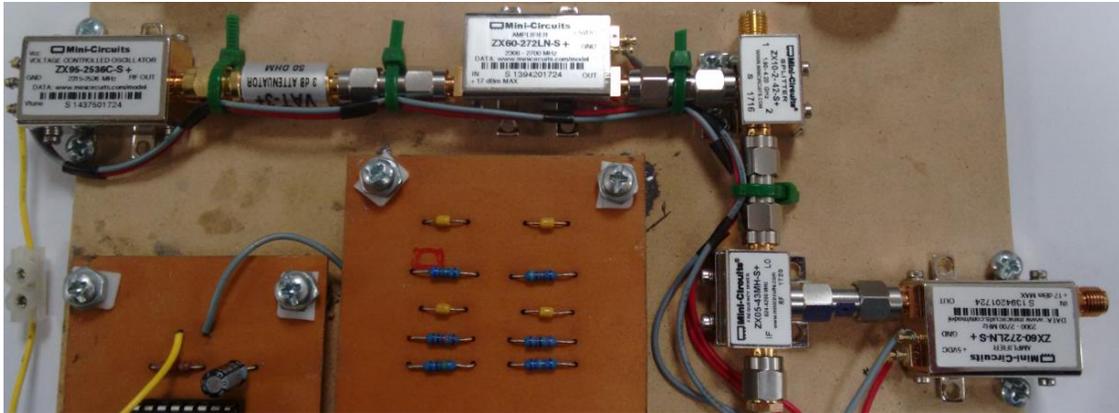


Figura 3-6: Sub-sistema de cadena RF, de izquierda a derecha, VCO (ZX95-2536C-S+), atenuador (VAT-3), amplificador de potencia (ZX60-272N), divisor de potencia (ZX10-2-42-S+), mezclador (ZX05-43MH-S+) y amplificador de potencia de bajo ruido (ZX60-272N).

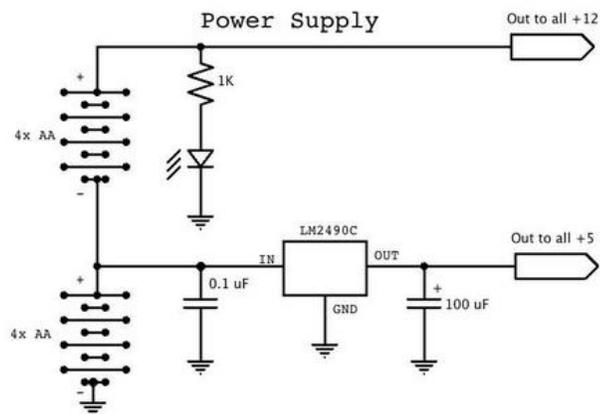


Figura 3-7: Circuito esquemático correspondiente a la fuente de energía del sistema [21].

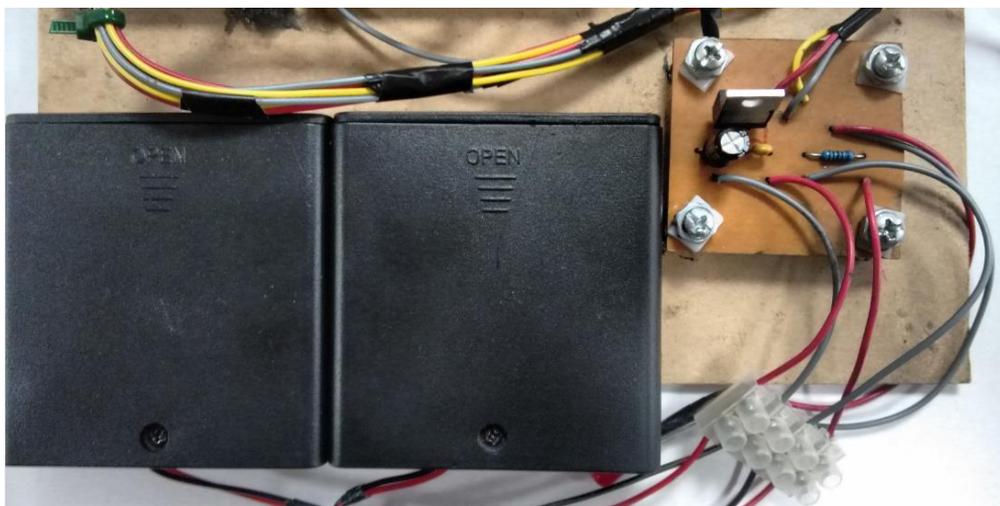


Figura 3-8: Sub-sistema de energía, a la izquierda se encuentran los 2 bancos de baterías, cada uno de 4 pilas AA, a la derecha se encuentra el regulador de voltaje LM2490 que permite obtener los 5 [V] necesarios para resto del circuito, aparte de los 12[v] ya generados.

## 3.2 Algoritmo utilizado para el procesamiento de la señal

Una vez que la señal es filtrada pasa a la segunda etapa del proceso, que consiste en el procesamiento de los datos provenientes del filtro de video para transformar estos datos crudos en una imagen de fácil interpretación a través del algoritmo de focalización.

El algoritmo SAR para la focalización de la imagen utilizado en este proyecto, se basa en el algoritmo *Range Migration* (RMA) de [35] y fue escrito por Gregory L. Charvart en [12]. Este algoritmo se utiliza como base en el curso extracurricular dictado por el MIT [36].

Este algoritmo se aplica a través del programa MATLAB, el cual es un potente software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M), entre sus prestaciones básicas se halla: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con otros programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

### 3.2.1 Algoritmo Range-Migration en MATLAB

El algoritmo completo se puede revisar en el Apéndice B. Se utiliza este algoritmo ya que comparado con los otros existentes como lo son el algoritmo *Range-Doppler* (RDA) y el *Chirp Scaling* (CSA) tiene una importante ventaja, que consiste en que los frentes de ondas que se producen luego del procesamiento de la señal no son planas, lo que permite evitar el “*Defocus*” y la distorsión geométrica de la imagen final. Este algoritmo se explicará a través de un ejemplo, en el cual se utiliza datos provistos por el MIT que se obtuvieron utilizando el mismo radar fabricado para este proyecto y pertenecen al lugar de la Figura 3-9.



Figura 3-9: Imagen del terreno analizar para generar la imagen SAR [21].

Este algoritmo consta principalmente de dos partes, el **Pre-procesamiento** y la **Formación de la imagen**, en la Figura 3-22 se puede ver el diagrama de bloques completo del algoritmo y en la Figura 3-10 se puede ver la estructura principal de este algoritmo.

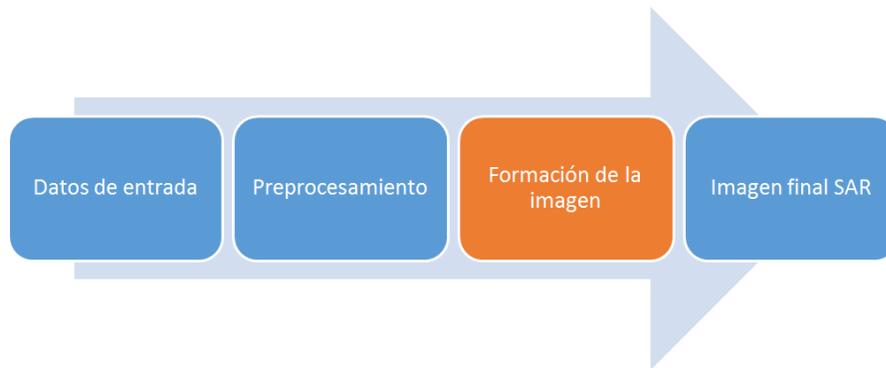


Figura 3-10: Estructura principal del algoritmo *Range-Migration* (RMA).

- **Pre-procesamiento:** consiste en el primer paso de este algoritmo, el cual se realiza en el dominio del tiempo, esta etapa tiene como misión tomar los datos adquiridos por el radar, ordenarlos y prepararlos en una matriz de datos crudos (o matriz *RAW*) para su posterior procesamiento. Este primer paso está compuesto por las siguientes etapas (ver Figura 3-11):

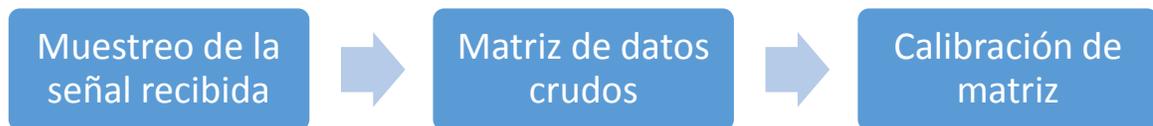


Figura 3-11: Diagrama de bloques de las etapas que componen el Pre-procesamiento.

1. **Muestreo de la señal:** se realiza un muestreo de la señal, para convertir estos datos análogos (.wav) en digital utilizando la función `audioread` de MatLab, muestreando la señal a 44.000 muestras por segundos.
2. **Matriz de datos crudos:** se crea la matriz de datos crudos, es decir, se ordenan los datos anteriormente discretizados. Este proceso se puede dividir en tres etapas:
  - **Análisis de datos por posición:** este primer proceso indica cuantos pulsos fueron enviados durante el tiempo que estuvo en escena el radar, lo cual se logra gracias a la señal de sincronismo que entrega el modulador (ver Figura 3-28), esta señal indica cuantos pulsos fueron enviados durante el tiempo que estuvo en escena el radar, por ende indica a la vez cuantos ecos se recibieron de la zona iluminada. Se extraen estos datos y se guardan en las filas de la matriz *RAW* [12].

- **Análisis de datos por pulso:** esta etapa consta de analizar los datos por pulso, es decir, cuantas muestras por pulso deben haber en cada uno de los ecos. Para esto se utiliza nuevamente la señal de sincronismo pero esta vez se extraen los datos directamente de la matriz *RAW*, matriz donde previamente se habían guardado los datos de acuerdo a su posición. Esto permite extraer el número correcto de muestras que deberían existir en cada uno de los ecos de la matriz, luego cada uno de estos datos se guardan en una nueva matriz *RAW*, donde en las filas se tienen todos los ecos recibidos por posición (eje acimut) y en las columnas se tiene todas las muestras obtenidas en cada uno de los ecos (eje del rango) [12], ver Figura 3-21.
  - **Transformada de Hilbert:** a la matriz *RAW* se le aplica la transformada de Hilbert, la cual es una herramienta matemática útil para describir la envolvente compleja de una señal modulada por una portadora real, lo que permite transformar los datos a su forma analítica y así obtener el módulo y la fase de cada una de las muestras, obteniendo finalmente la matriz de datos crudos.
3. **Calibración de matriz:** ya teniendo la matriz de datos crudos formada y en su forma compleja, se procede a fijar las últimas constantes sobre la geometría del radar y calibrarlo, guardando las variables de interés para su procesamiento.
- **Formación de la imagen:** en esta segunda etapa, se toman los datos previamente ordenados en la matriz datos crudo o matriz *RAW* y se le realizan las respectivas transformaciones para lograr la formación de la imagen en el dominio de la frecuencia. La matriz de datos crudo viene definida del proceso anterior de la siguiente forma  $sif(x_n, \omega(t))$ , donde la palabra “*sif*” significa “Señal de frecuencia intermedia”,  $x_n$  es el número de ecos recibidos y  $\omega(t)$  es el número de muestras por ecos. Este proceso de la formación de imagen SAR se puede dividir en las siguientes etapas (verFigura 3-12):



Figura 3-12: Diagrama de bloques de las etapas que componen la Formación de imagen SAR.

1. **Transformada de Fourier en eje acimut:** se procede a calcular la Transformada de Fourier Discreta (DFT) a lo largo del eje acimut de la matriz de datos crudos  $sif(x_n, \omega(t))$ , dando como resultado una matriz en el dominio del número de onda o dominio de las frecuencias, quedando de la siguiente forma  $sif(k_x, \omega(t))$ . Además en esta etapa, realizando la substitución de  $k_r = \omega(t)/c$  y aplicando la FFT a lo largo de esta dirección se logra que la matriz *RAW* de la forma  $sif(k_x, \omega(t))$  se convierta en  $sif(k_x, k_r)$ . Esto produce a la vez una compresión de los datos en dirección del acimut. En la Figura 3-13 se muestra la fase del eje acimut antes de aplicar FFT, en la Figura 3-14 se muestra la fase

de acimut después de aplicar la FFT y por último en la Figura 3-15 se muestra la magnitud después de aplicarle la FFT al eje acimut.

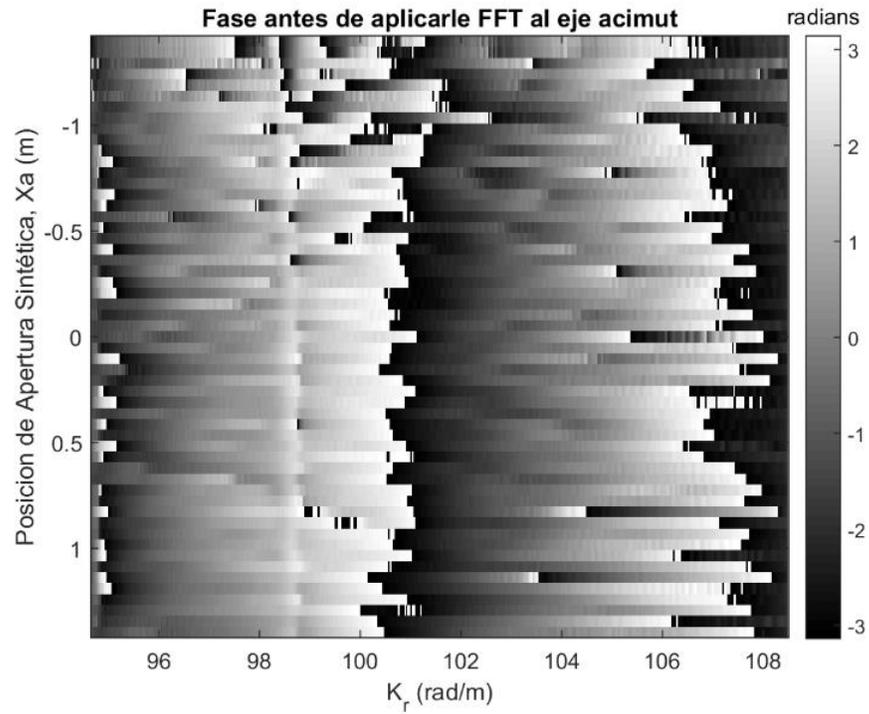


Figura 3-13: Fase antes de aplicarle FFT al eje acimut [12].

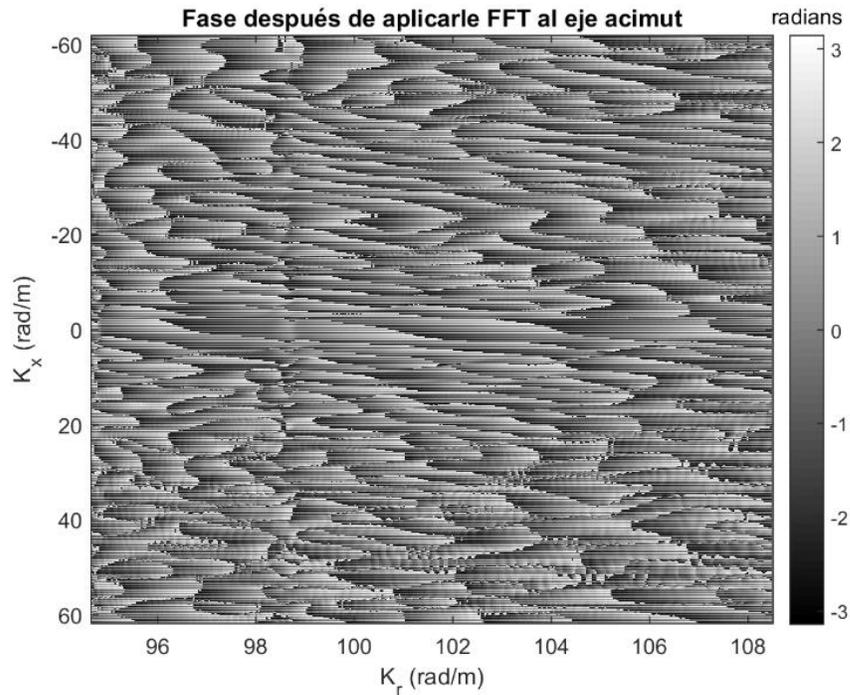


Figura 3-14: Fase después de aplicarle FFT al eje acimut [12].

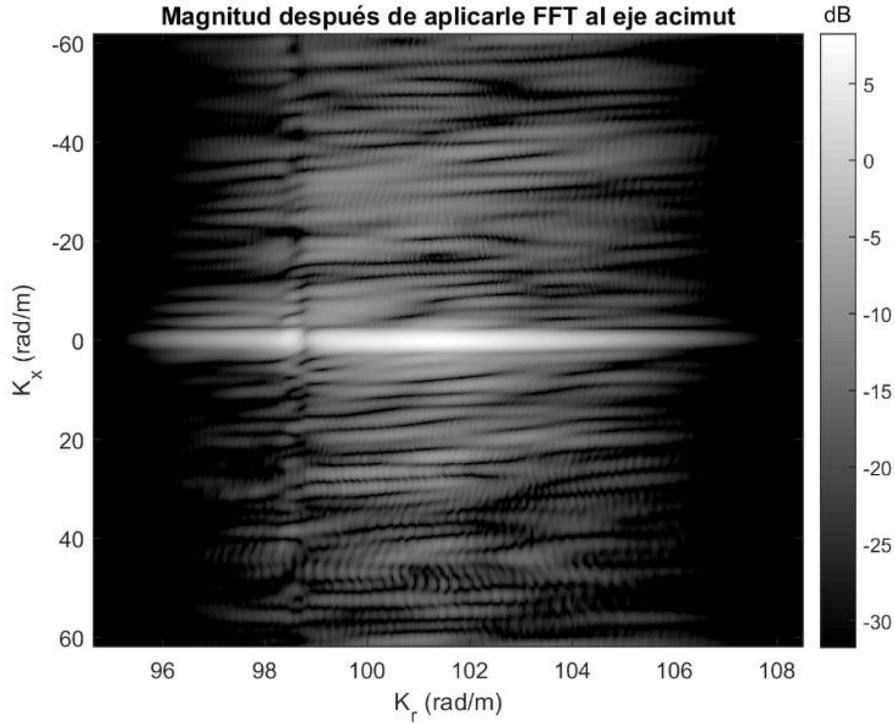


Figura 3-15: Magnitud después de aplicarle FFT al eje acimut [12].

2. **Aplicación del filtro adaptado o *Matched filter***: la ecuación que rige al filtro adaptado en el algoritmo RMA es [12]:

$$s_{mf}(k_x, k_r) = \exp\left(jR_s\sqrt{k_r^2 - k_x^2}\right) \quad (3-1)$$

Donde  $R_s$  es la distancia perpendicular al centro de la escena de la cual se desea medir, esta distancia también es llamada “distancia tierra”. Lo principal que se hace en esta etapa es multiplicar la matriz  $sif(k_x, \omega(t))$  con la ecuación (3-1), produciendo una compresión de los datos en dirección del rango. Obteniendo lo siguiente:

$$s_{matched}(k_x, k_r) = s_{mf}(k_x, k_r) \cdot sif(k_x, k_r) \quad (3-2)$$

El resultado de la fase que se obtiene de esta multiplicación se puede ver en la Figura 3-16 y el resultado de la magnitud en “rango tierra” luego de aplicarle la FFT se puede ver en la Figura 3-17.

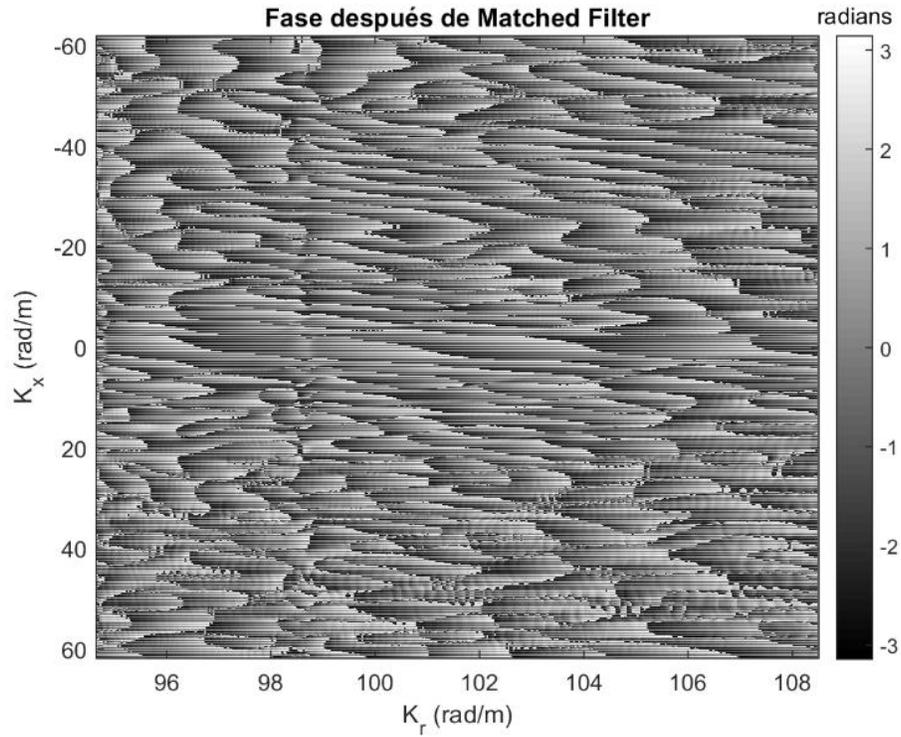


Figura 3-16: Fase después de Matched Filter [12].

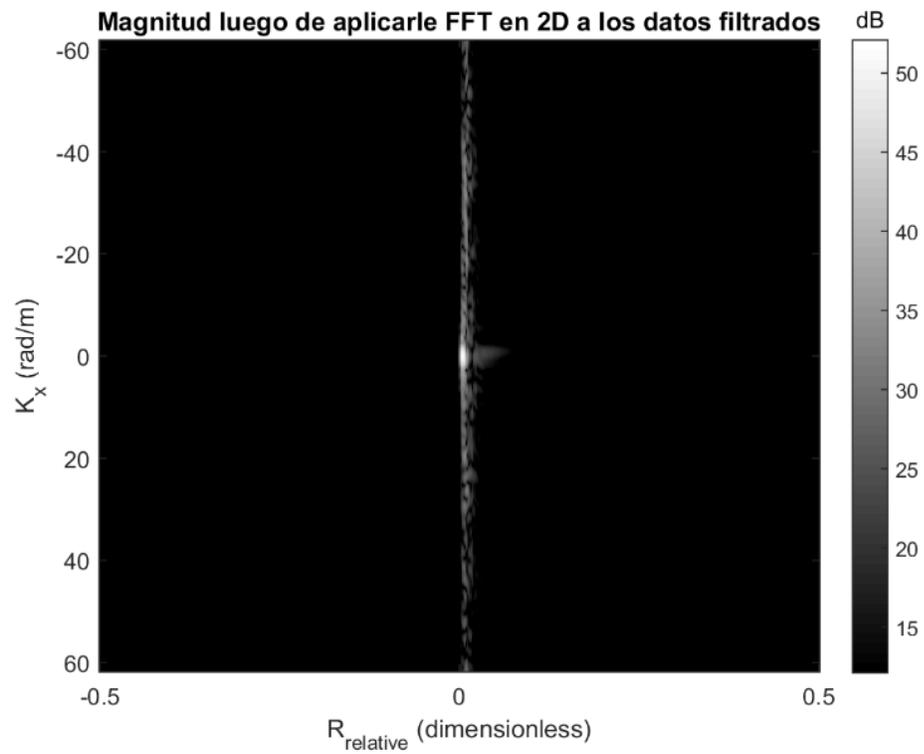


Figura 3-17: Magnitud después de aplicarle FFT en 2D a los datos filtrados [12].

3. **Transformada de Stolt:** la tercera etapa de la Formación de imagen consiste en aplicar la interpolación de Stolt, la cual transforma los datos provenientes de la etapa anterior, específicamente los datos en la dirección de  $k_r$  al dominio del número de onda espacial  $k_y$  y esto se logra con la aplicación de esta transformada, ya que permite relacionar las variables  $k_y$ ,  $k_r$  y  $k_x$  de la siguiente forma:

$$k_y = \sqrt{k_r^2 - k_x^2}$$

Se debe realizar una interpolación en 1D a través de todos los números de onda o todos los valores del rango tierra o "distancia tierra"  $k_r$ , resultando de este modo la matriz interpolada Stolt  $S_{st}(k_x, k_y)$ . La fase resultante después de la interpolación de Stolt se puede ver en la Figura 3-18.

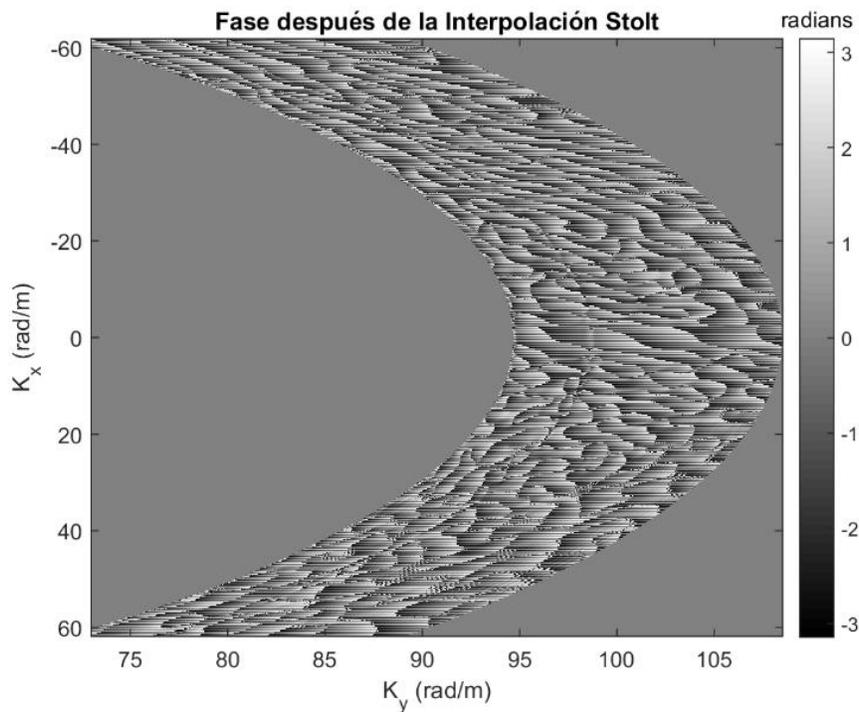


Figura 3-18: Fase después de la interpolación Stolt [12].

4. **Transformada inversa de Fourier en 2D:** el último paso es convertir la matriz interpolada Stolt  $S_{st}(k_x, k_y)$  al dominio del tiempo  $S(X, Y)$ , para lo cual se debe tomar una sub-sección de los datos interpolados Stolt curvos y aplicarles la transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) en 2D a esta sub-sección de datos de la interpolación Stolt. Logrando finalmente la imagen final SAR de la zona iluminada, ver Figura 3-19 y Figura 3-20.

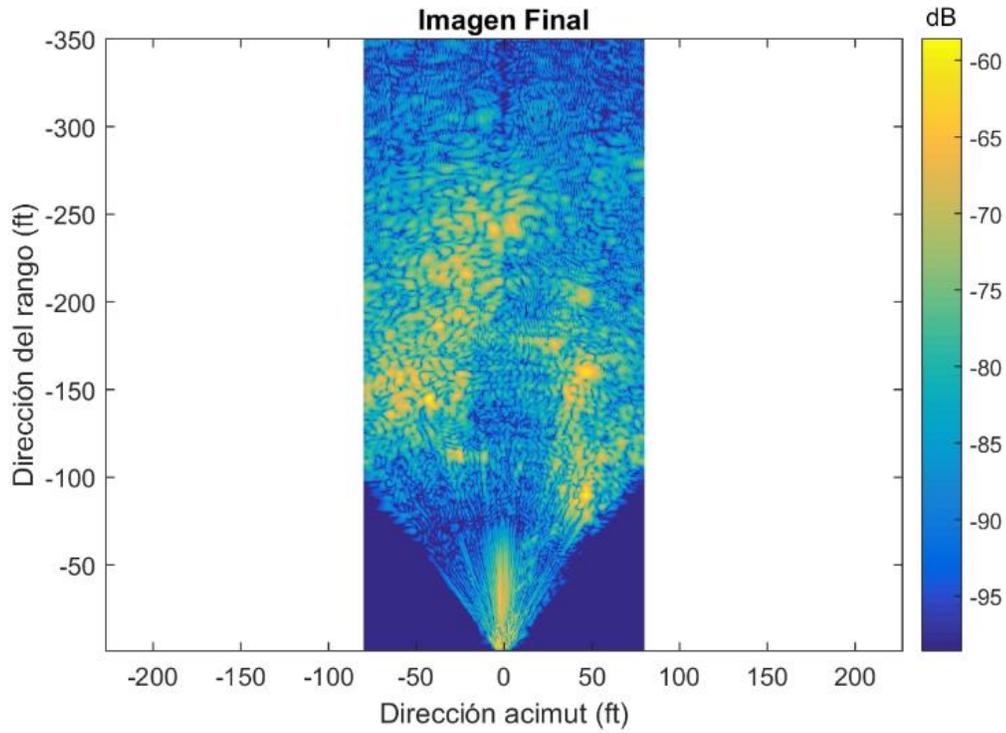


Figura 3-19: Imagen final SAR [12].

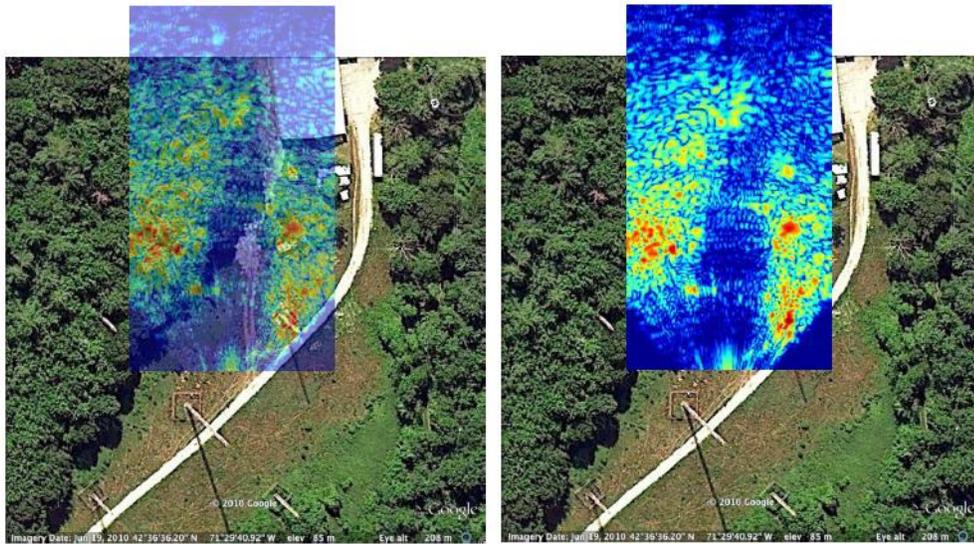


Figura 3-20: Imagen SAR superpuesta sobre la imagen del lugar analizado [12].

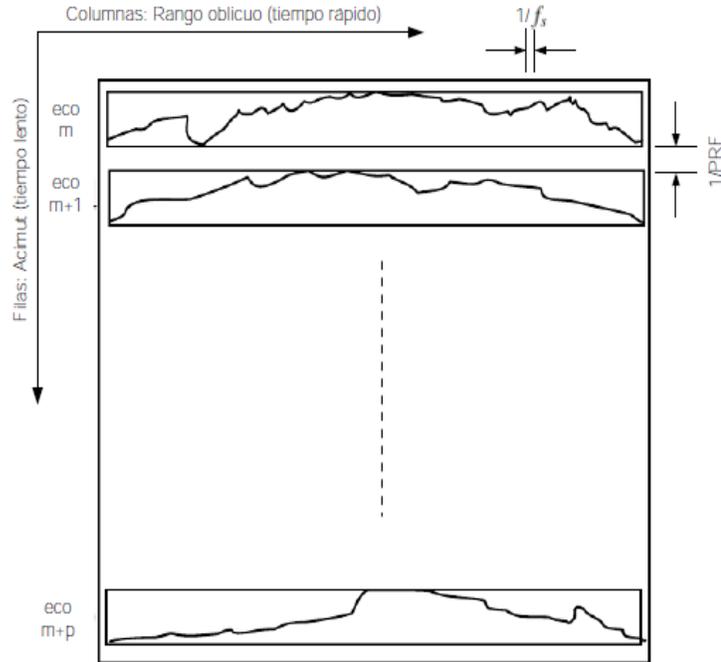


Figura 3-21: Diagrama de la matriz de datos crudos o RAW, las filas de la matriz (dirección acimut) corresponde al número de ecos recibidos mientras que las columnas (rango oblicuo) corresponde al número de muestra en cada eco recibido [37].



Figura 3-22: Diagrama de bloques completo del algoritmo *Range-Migration* (RMA), en color azul se pueden ver las etapas del “Pre-procesamiento” de la señal en el dominio del tiempo y en color naranja las etapas de la “Formación de la imagen” en el dominio de la frecuencia.

### 3.3 Metodología utilizada para realizar la generación de imágenes mediante el radar LFM-CW fabricado

A continuación se explicará el proceso que se debe realizar para poder lograr la generación de imágenes tipo SAR mediante este radar (ver Figura 3-30):

1. El radar fabricado debe ser montado y asegurado sobre el riel de 60 [cm] (ver Figura 3-23 y Figura 3-24) el cual proporciona la generación de la apertura sintética. En el caso de necesitar una apertura mayor, el riel a su vez se debe montar sobre una base movable (ver Figura 3-25 y Figura 3-26).
2. Trazar las trayectoria de desplazamiento del riel cuando se necesite de un desplazamiento mayor a 60 [cm].
3. Se procede a grabar la señal de sincronismo proveniente el circuito modulador con la ayuda de un computador, señal que se debería encontrar en el canal izquierdo de la tarjeta de sonido del computador, utilizando el programa “Audacity” (ver Figura 3-29).
4. Una vez ya guardada y cargada esta señal de sincronismo, se procede a configurar el programa de desplazamiento del riel, para lograr de esta forma que el desplazamiento del riel con la señal proveniente del modulador estén en sincronismo. Para este proyecto, se configuró el riel para que se detenga por 2 [s] cada 5 [cm] de desplazamiento, lo mismo se hizo para la señal de sincronismo.
5. Luego, de que tanto el desplazamiento del riel como la señal de sincronismo estén preparadas, se procede con la transmisión y recepción de los ecos por parte del sistema, los cuales son grabados por el computador a través del programa “Audacity”.
6. Una vez que el radar realiza toda su apertura sintética a través del riel, se procede a procesar las señales almacenadas, utilizando el algoritmo de Migración de Rango en MATLAB como se explica en la subsección 3.2.1.
7. Antes de realizar el procesamiento de la señal y si es necesario, se modifican algunos de los parámetros del algoritmo utilizado en MATLAB, como por ejemplo el ancho de banda de la señal, la apertura sintética ( $L_s$ ) o también puede ser el rango de referencia ( $R_s$ ).

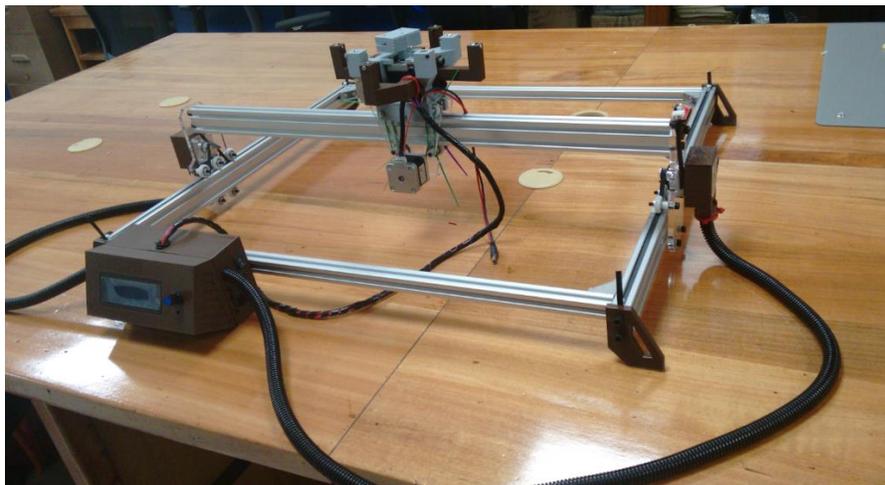


Figura 3-23: Riel de 60 [cm] sobre el cual va montado el radar LFM-CW.

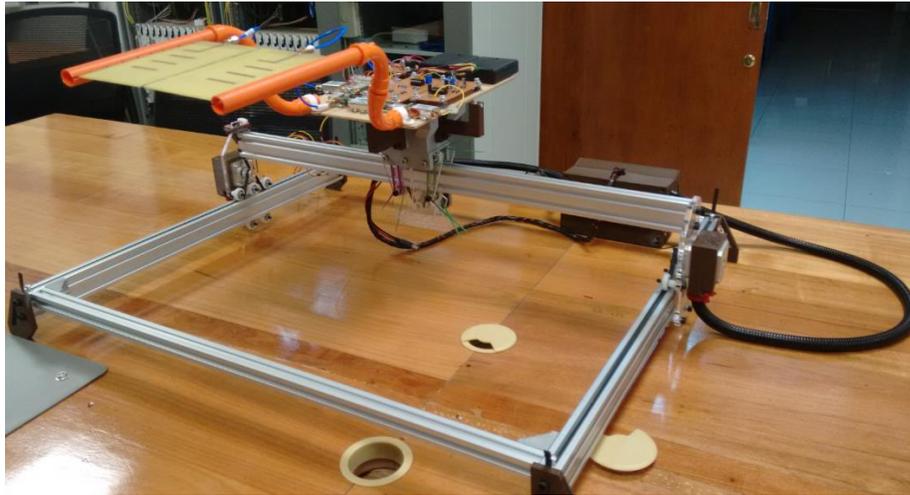


Figura 3-24: Radar LFM-CW montado y asegurado sobre el riel de 60 [cm].



Figura 3-25: Base móvil utilizada para la adquisición y desplazamiento del radar, cuando se necesita de una apertura sintética mayor.



Figura 3-26: Radar montado y asegurado en conjunto con el riel sobre la base móvil.

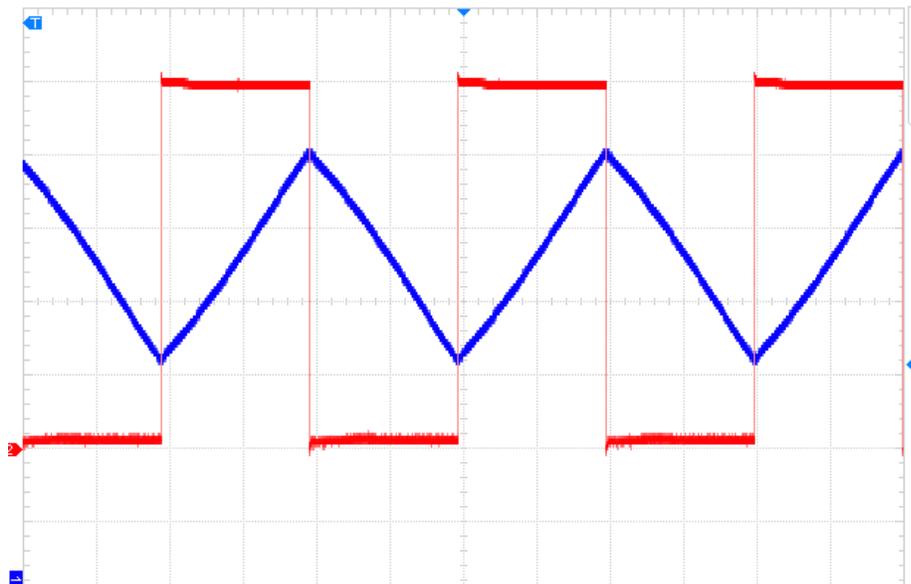


Figura 3-27: Señales generadas por el circuito modulador, en azul, la señal moduladora que ingresa al VCO de la cual solo se utiliza la parte ascendente de la señal y en rojo la señal de sincronismo que ingresa al canal izquierdo de la tarjeta de audio del Sub-sistema PC.

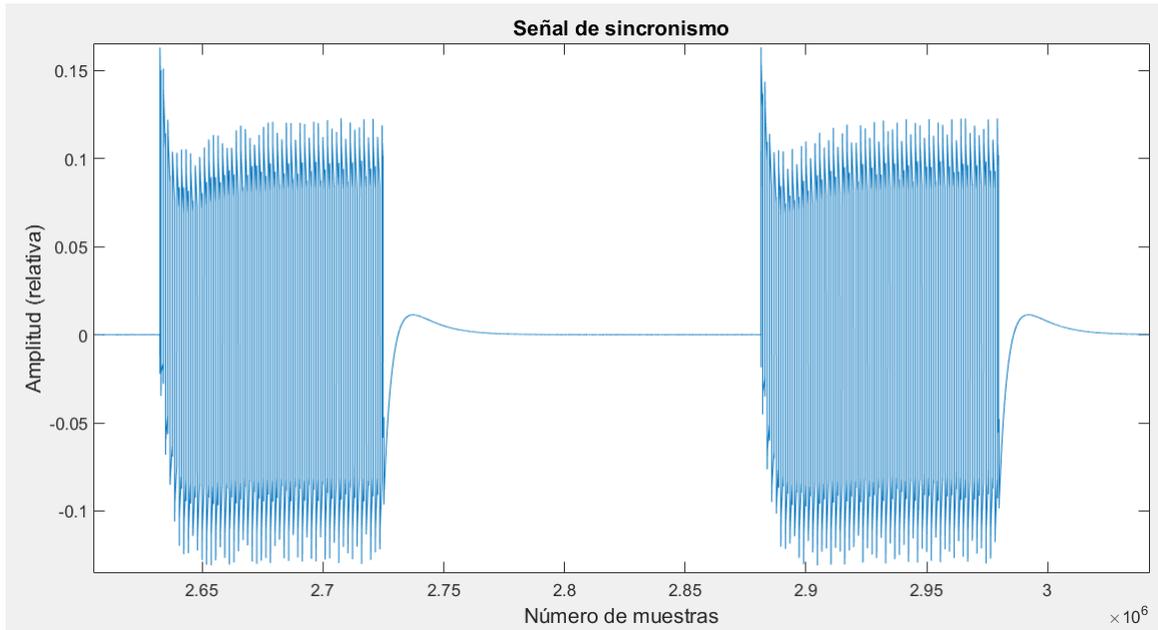


Figura 3-28: Señal de sincronismo muestreada en MATLAB y lista para ser utilizada en el procesamiento de la señal.

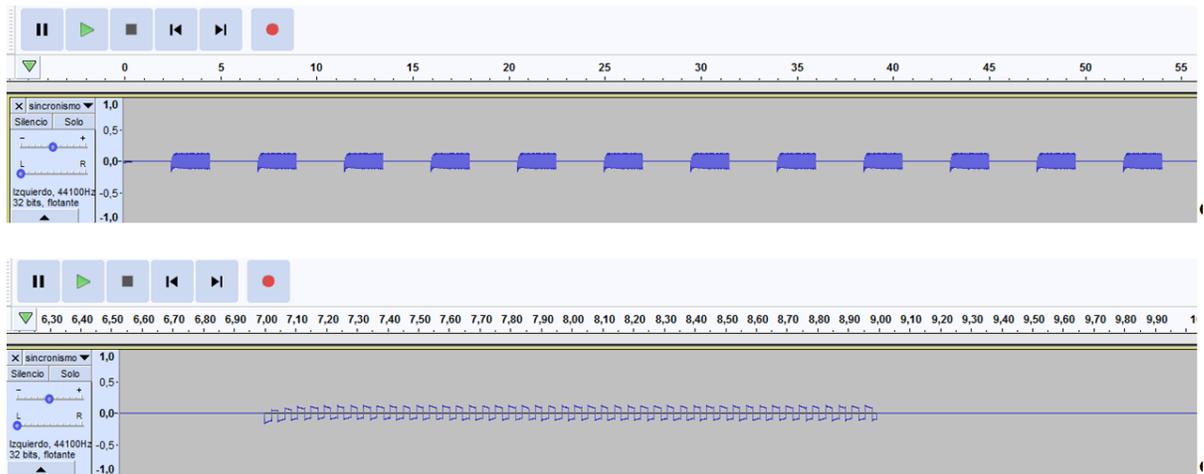


Figura 3-29: Señal de sincronismo grabada desde la salida del modulador a través de un computador utilizando el programa “Audacity”.

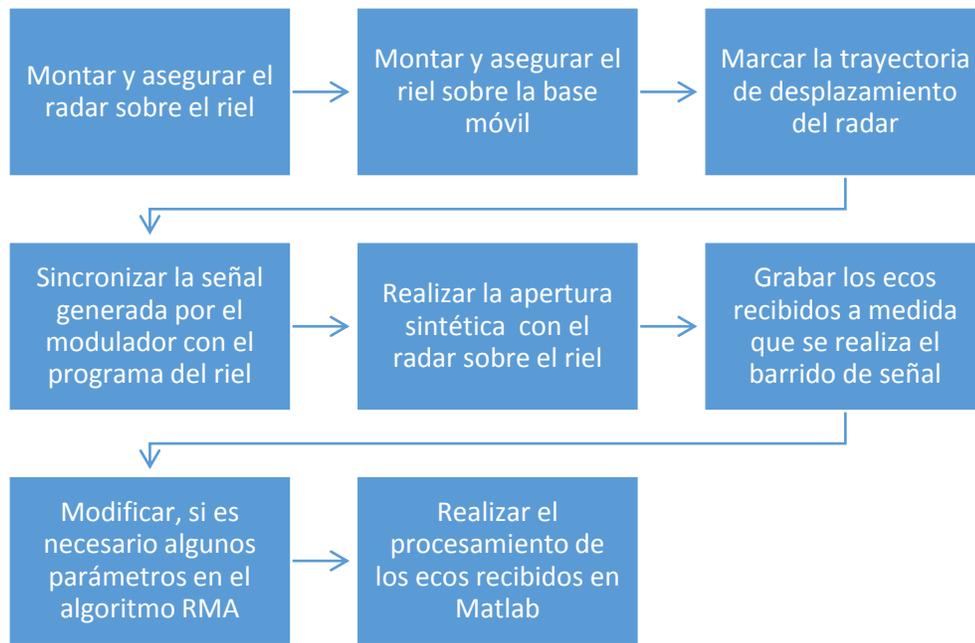


Figura 3-30: Metodología utilizada para la generación de imágenes mediante el radar fabricado.

### 3.4 Resultados obtenidos

La mayoría de las pruebas que fueron realizadas dentro de un recinto se llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, específicamente en el tercer piso de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE), mientras que las pruebas realizadas al aire libre se llevaron a cabo frente a la Facultad de Ingeniería, en un sector de áreas verdes. A continuación se presenta cuatro de las pruebas más importantes realizadas, tres de ellas realizadas dentro de la Facultad de Ingeniería y una de ellas realizada al aire libre.

Para realizar las pruebas “*indoor*”, el radar fue ubicado a 2,5 [m] del principio del pasillo y a una altura de 1 [m] del suelo. El primer paso fue trazar una trayectoria de 2,4 [m] a lo ancho del pasillo (representada con una raya roja en Figura 3-35), luego se comenzó con la obtención de las imágenes del lugar, desplazando el radar por la trayectoria marcada a medida que se transmitía y se recibían las señales de los ecos reflejados del lugar. Esta longitud de desplazamiento fue seleccionada en base a [12], ya que según [12] es la longitud óptima para obtener una correcta imagen SAR utilizando este tipo de radar. Para lograr que el radar complete este desplazamiento se desplazó la base móvil cada vez que terminaba un barrido de 60[cm]. En la Tabla 3-1 se encuentra la configuración utilizada por el radar para realizar las pruebas.

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

Tabla 3-1: Resumen de la configuración utilizada por el radar para realizar las pruebas.

Parámetro	Valor
Frecuencia central de trabajo ( $f_c$ )	2,45 [GHz]
Ancho de banda ( $B$ )	100 [MHz]
Banda de trabajo (ISM)	2,4 [GHz]-2,5 [GHz]
Tiempo del pulso ( $\tau$ )	20 [ms]
Chip rate ( $cr$ )	5 [GHz/s]
Número de muestras por pulso	882 muestras/pulso
Potencia de transmisión ( $P_{Tx}$ )	13,6 [dBm]
Longitud de desplazamiento del radar	2,4 [m]
Obtención de datos por desplazamiento	Cada 5 [cm]
Autonomía de energía	$\approx$ 6,5 [h]

Para poder constatar los resultados de las imágenes obtenidas y entender lo que se presenta en cada una de ellas, se diseñó un plano arquitectónico simple del lugar con la ayuda del programa computacional “Autocad”, el cual fue escalado a las mismas dimensiones de la imagen que entrega el algoritmo de focalización utilizado, que corresponde a 1:500 (1[cm] corresponde a 5[m]), ver Figura 3-31.

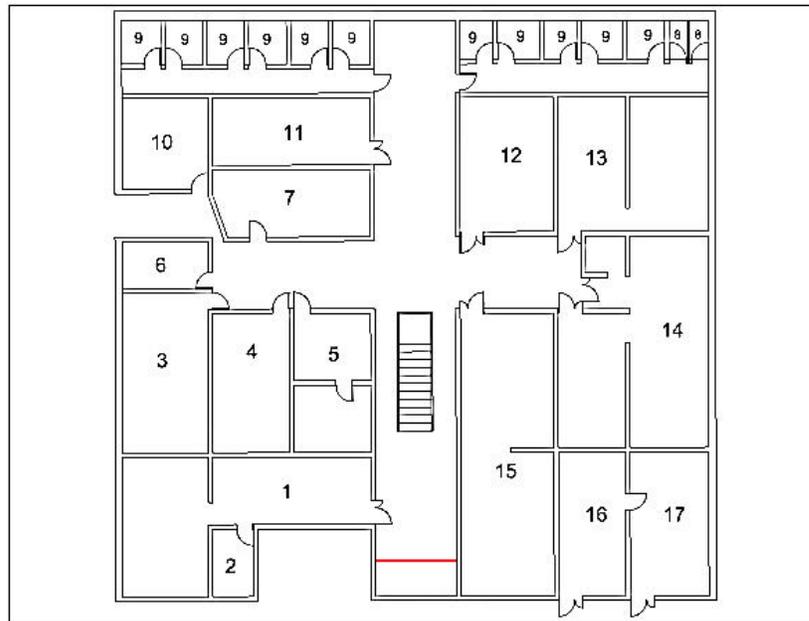


Figura 3-31: Plano arquitectónico simple del tercer piso de la EIE-PUCV.

Cada uno de los números representa los diferentes lugares de esta planta, los cuales se encuentran definidos en la Tabla 3-2.

## Sistema fabricado para la generación de imágenes mediante RADAR

Tabla 3-2: Clasificación de los lugares de acuerdo a la numeración en el plano diseñado.

Nombre del lugar designado	Número en el plano
Laboratorio de Telecomunicaciones	1
Oficina Profesores	2
Laboratorio de sistemas digitales	3
Laboratorio Digitales	4
Laboratorio Procesadores	5
Laboratorio de sistemas digitales B	6
Pañol	7
Baños	8
Oficinas	9
Taller de mantención eléctrica	10
Sala de conferencias	11
Laboratorio de simulaciones	12
Laboratorio de electricidad y circuitos	13
Laboratorio de control automático	14
Laboratorio de robótica	15
Laboratorio de sistemas electrónicos e instrumentación	16,17

En primer lugar, se generó una imagen de la planta, sin tener un objetivo en específico, obteniendo la Figura 3-32 tipo SAR del lugar, la cual se comparó con el plano arquitectónico de la Figura 3-31 en la Figura 3-33.

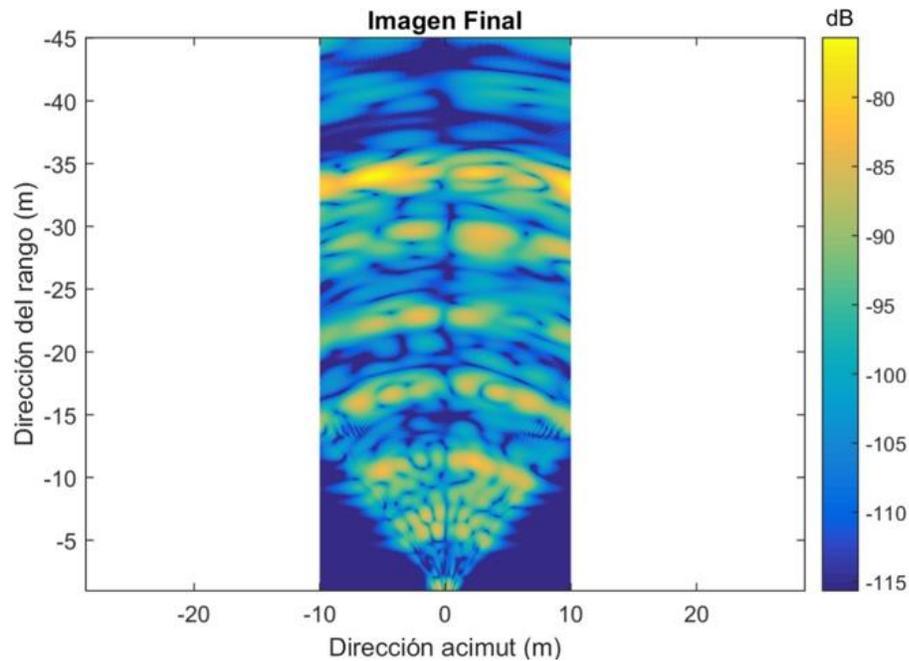


Figura 3-32: Imagen SAR del 3 piso de la EIE obtenida con el radar fabricado.

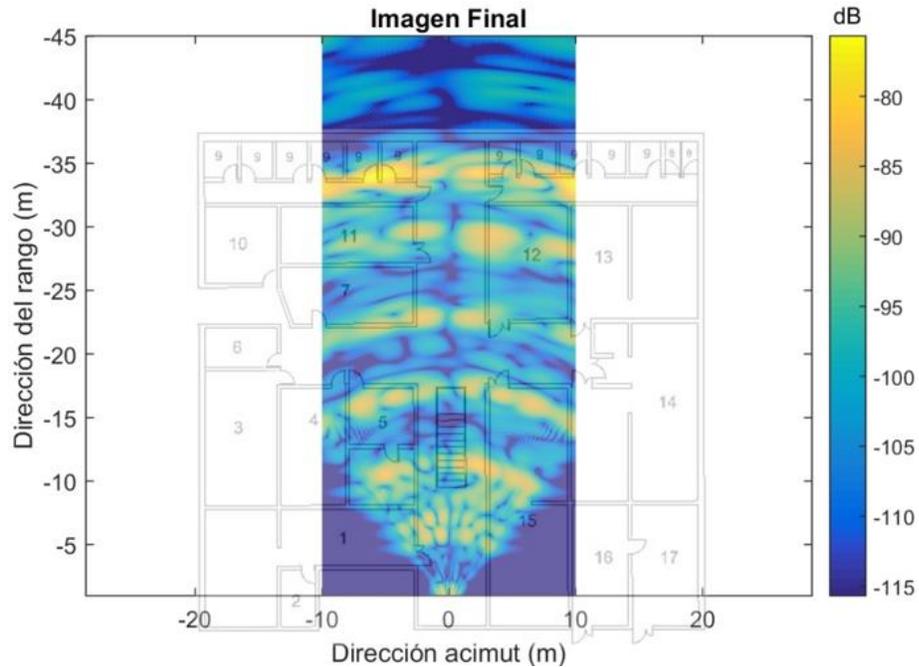


Figura 3-33: Comparación de la imagen SAR del 3 piso de la EIE con el plano arquitectónico diseñado.

En la Figura 3-33 se puede ver que hay ciertos objetos que reflejan mayor cantidad de ecos que otros, particularmente los metálicos, por lo cual se identificaron las bancas metálicas/madera (Figura 3-34) que existen en el pasillo y se dibujaron en el plano con cuadros negro. Para facilitar el análisis, las dimensiones presentadas en el plano de estas bancas fueron aumentadas, de tal forma que sea más fácil entender la imagen generada, también fue agregado un panel de madera (Figura 3-35) que se encuentra a un costado de la escalera y de esta forma ver si también se logra visualizar este objeto en la imagen. Una vez identificados los objetos en el plano (ver Figura 3-36) se volvió a montar la imagen SAR sobre el plano, ver Figura 3-37.



Figura 3-34: bancas metálicas/madera que se encuentra en EIE-PUCV, las dimensiones de la base son, ancho: 46 [cm], largo: 1,5 [m], alto: 46 [cm], las dimensiones del espaldar son, largo: 1,5 [m] y ancho: 45 [cm].



Figura 3-35: Panel de madera que se encuentra en el 3 piso de la EIE-PUCV, las dimensiones del panel son, alto: 1,8 [m], largo del panel: 85 [cm], ancho del panel: 75 [cm], grosor del panel: 10 [cm].

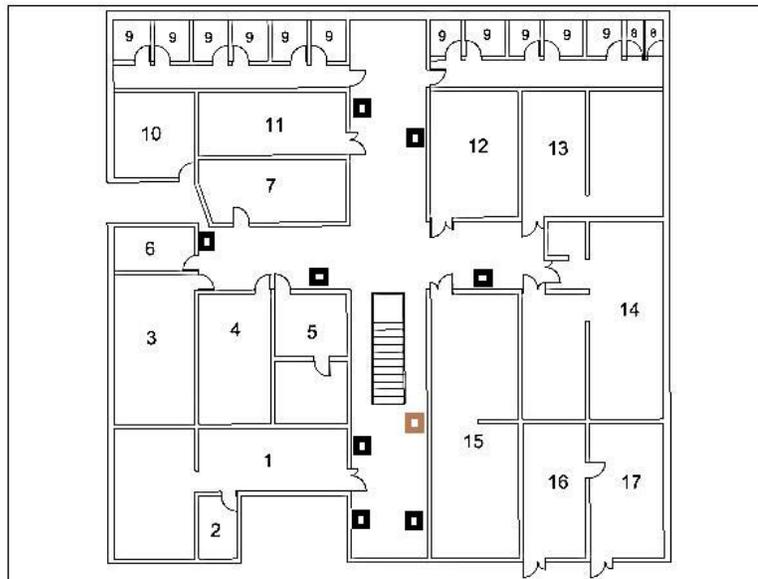


Figura 3-36: Plano arquitectónico simple del tercer piso de la EIE-PUCV, incluyendo bancas metálicas/madera en color negro y el panel de madera al inicio de la escalera en color café.

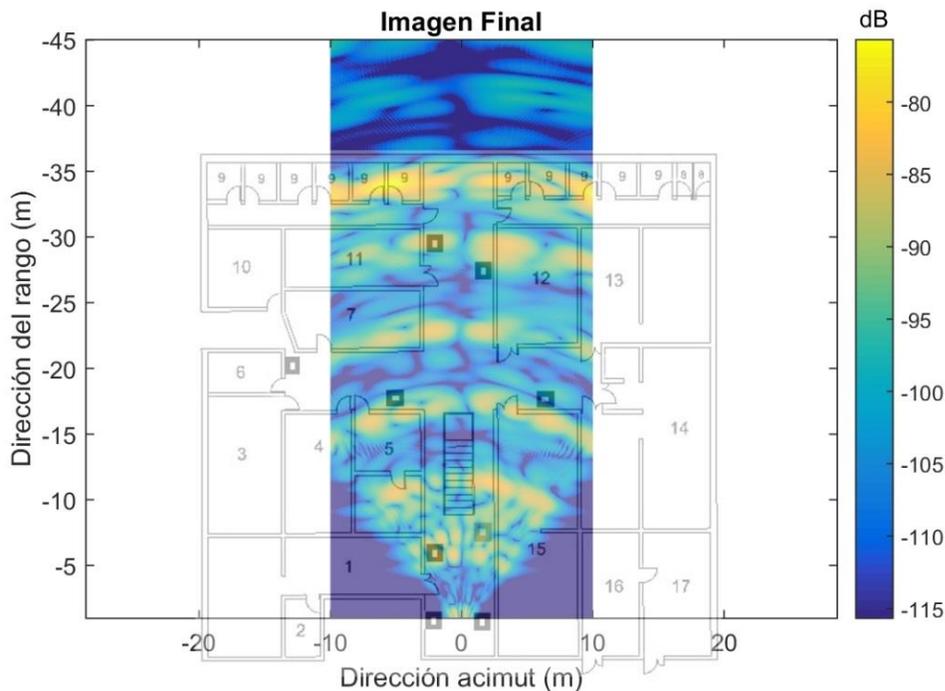


Figura 3-37: Imagen SAR del tercer piso de la EIE obtenida con el radar fabricado, comparándola con el plano arquitectónico fabricado que incluye las bancas metálicas/madera y el tablero de madera.

En la Figura 3-37 se puede observar que las bancas al estar construidas en mayor parte con metal, reflejan mejor las señales que las otras estructuras cercanas, lo cual puede verse reflejado en la imagen SAR generada, ya que los puntos en esos sectores tienen una intensidad mayor, mientras que los ecos reflejados por el tablero de madera a la derecha de la escalera lo hacen con menor intensidad. Existen otros puntos de gran intensidad en la imagen cercana a los 25 metros que pueden corresponder a los instrumentos metálicos que se encuentran en ese sector.

En la siguiente prueba se tomaron 4 bancas metálicas/madera y se colocaron en posición vertical, dos a la izquierda y dos a la derecha del pasillo cercano a los 35 [m], el panel de madera se acercó a una distancia de 8 [m] del radar (ver Figura 3-38) para ver si existía alguna variación respecto a la imagen anterior. De esta forma obteniendo la imagen SAR de la Figura 3-39 y comparando ambas en la Figura 3-40.

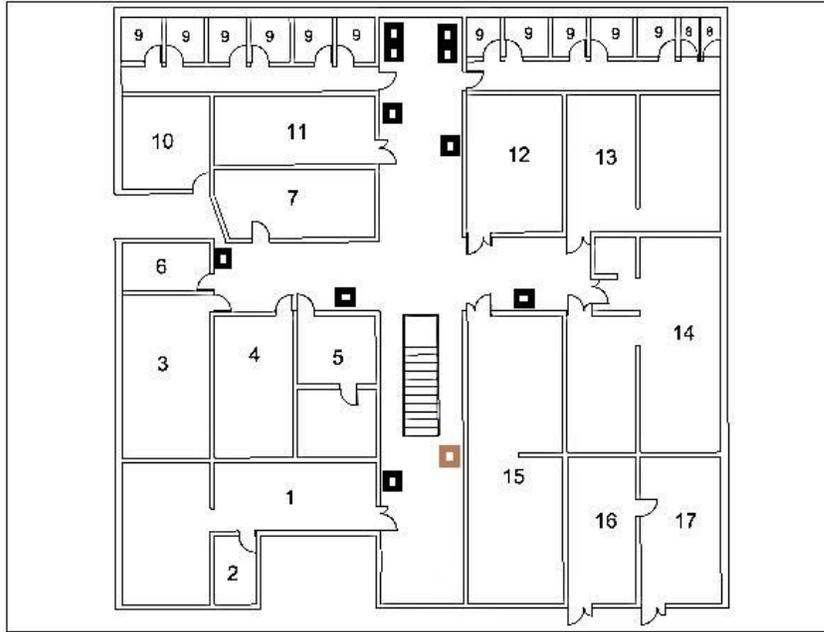


Figura 3-38: Plano arquitectónico simple del segundo piso de la EIE-PUCV, incluyendo las bancas metálicas/madera, el panel de madera al inicio de la escalera y los dos grupos de bancas al final del pasillo.

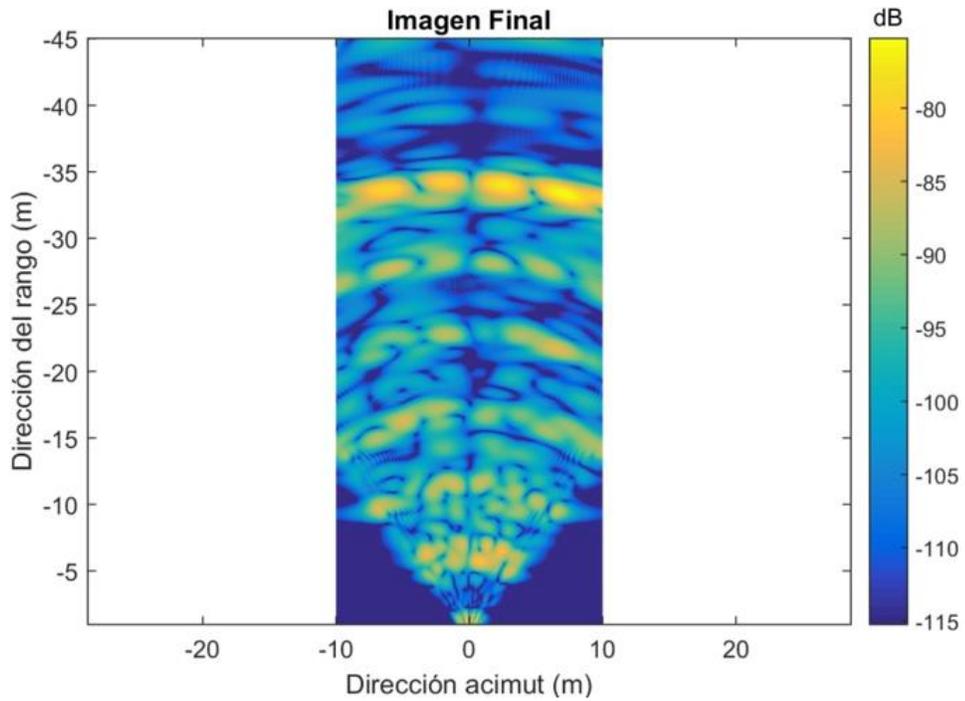


Figura 3-39: Imagen SAR del 3 piso de la EIE obtenida con el radar fabricado.

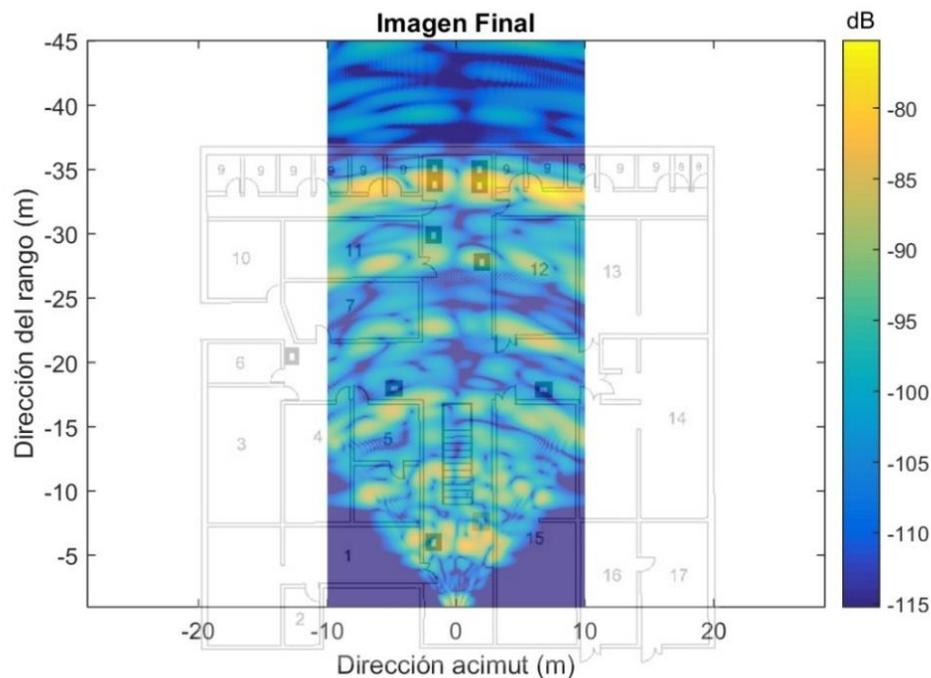


Figura 3-40: Imagen SAR del 3 piso de la EIE obtenida con el radar fabricado, comparándola con el plano arquitectónico fabricado que incluye las bancas metálicas/madera, el tablero de madera y dos grupos bancas al final del pasillo en vertical.

En la Figura 3-40 se puede ver claramente que los dos grupos de bancas al final del pasillo reflejan gran cantidad de la señal que reciben en comparación con las demás superficies, se puede ver también, que al disminuir la distancia del panel de madera con el radar, aumento su intensidad, lo que significa que se reflejó mayor cantidad de la señal que en la prueba anterior. A la vez, se observan dos puntos de gran intensidad a los lados de los dos grupos de bancas ubicadas a los 35[m], esto se puede atribuir a problemas en el desplazamiento del radar o bien a objetos metálicos de tamaño similar al de las bancas en esas oficinas.

En la siguiente prueba, se armó una letra con las bancas metálicas/madera, en específico la letra E alrededor de los 30 [m] del pasillo (ver Figura 3-41) y se analizó si el radar podía distinguirlas, ya que por las estimaciones de resolución mencionadas en la sub sección 2.5, tanto en acimut como en rango, el radar debería ser capaz de distinguir fácilmente una banca de otra. Obteniendo la Figura 3-42 tipo SAR la cual se comparó con el plano arquitectónico en la Figura 3-43.

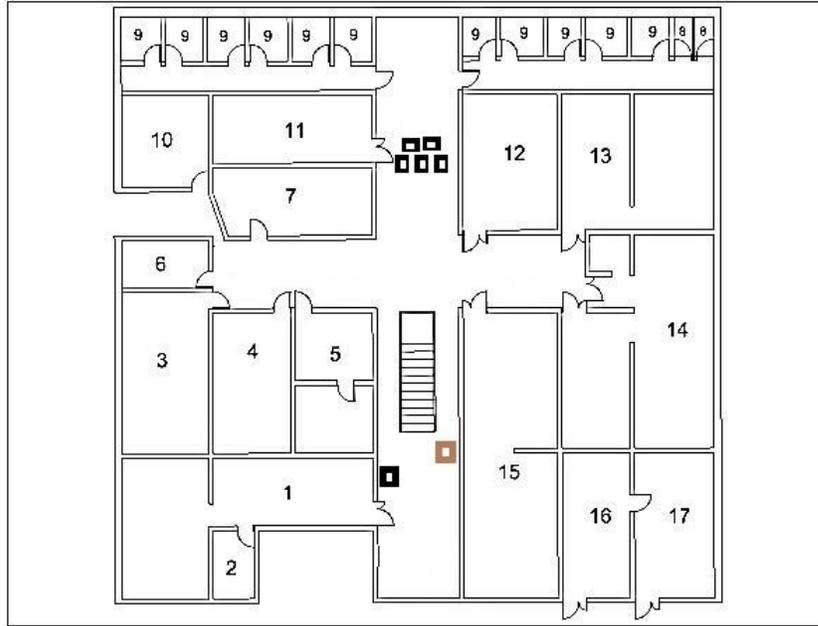


Figura 3-41: Plano arquitectónico simple del segundo piso de la EIE-PUCV, incluyendo las bancas metálicas/madera, el panel de madera al inicio de la escalera y las bancas formando la letra E a los 30 [m] de distancia.

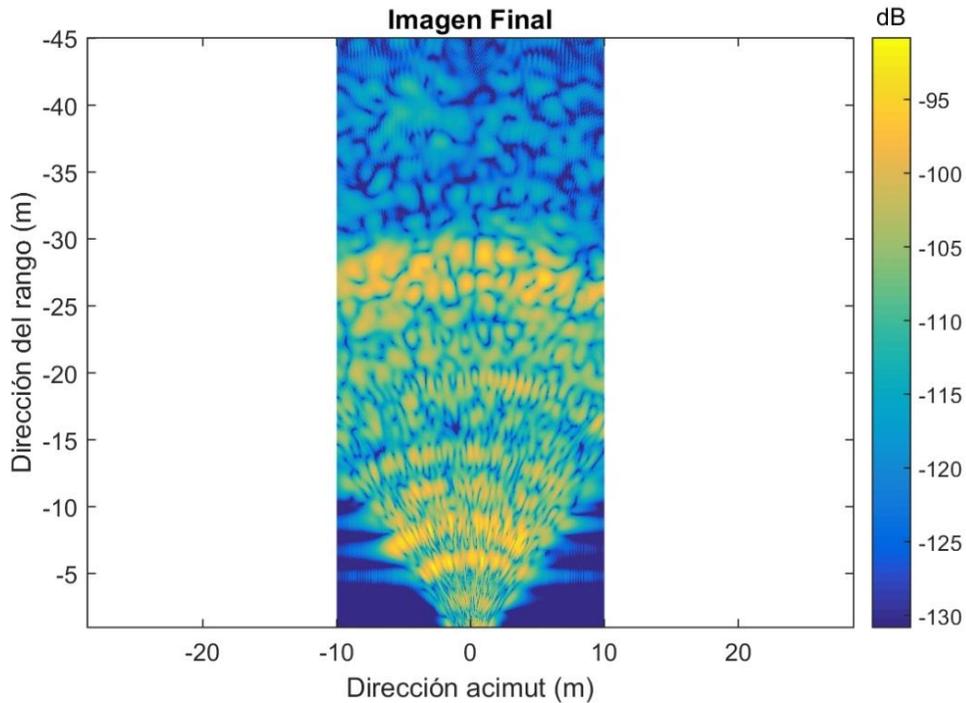


Figura 3-42: Imagen SAR generada en el pasillo de la segunda planta de la EIE-PUCV donde se observa a los 30 [m] puntos de gran intensidad que bosquejan la letra E construida con las bancas metálicas/madera.

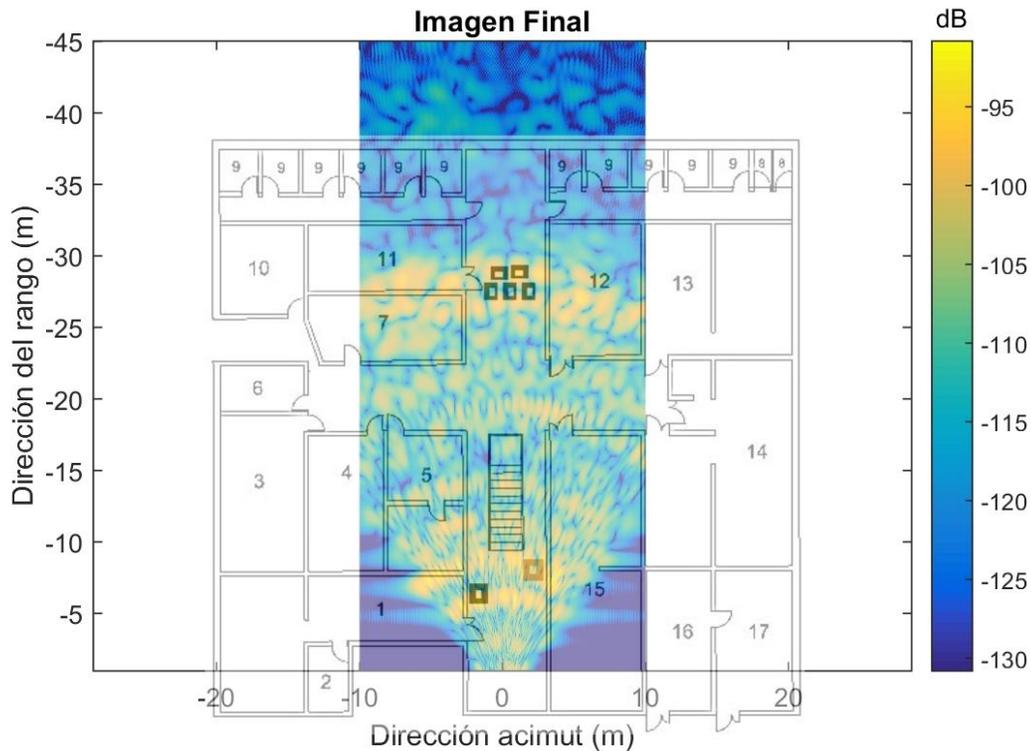


Figura 3-43: Comparación de la Imagen SAR obtenida con el plano arquitectónico, a la cual se le agrego la disposición en la que se ordenaron las bancas metálicas/madera a los 30 [m]

Se puede observar que a los 30 [m] se generaron puntos de mayor intensidad, que se asemejan a letra E formada con las bancas de metal/madera. Si bien, se alcanza a distinguir la letra E, existe mucho ruido a su alrededor, lo mismo sucede con la banca de metal/madera que está a una distancia de 8 [m] del radar y con el tablero que se encuentra a principio de la escalera.

Este ruido se puede atribuir nuevamente a que el desplazamiento que realiza el radar para seguir la trayectoria no es uniforme, ya que el riel es de solo 60 [cm], por lo que cada vez que termina un barrido, se debe desplazar la base móvil y volver a medir, así sucesivamente hasta lograr los 2,40 [m], si bien se colocaron marcas en el suelo para tratar de minimizar este tipo de errores, siempre existirá un leve error al momento de adquirir los datos por esta situación.

También puede atribuirse a distintas señales de interferencia que pueden existir en el entorno, como por ejemplo señales Wi-Fi o ecos reflejados por objetos no identificados, ya que en esta prueba se generó una imagen con mucha más interferencias en comparación con las anteriores.

La última prueba realizada se llevó a cabo al aire libre, en esta prueba, al igual que las realizadas al interior de la Facultad de Ingeniería el radar fue situado al inicio del sector (representada con una raya roja en la Figura 3-44), a la misma altura y con los mismos parámetros. El fin de realizar esta prueba consiste en disminuir la interferencia que puede existir dentro de la Facultad de

Ingeniería, ya sea de señales o de algún eco reflejado no deseado. Esta prueba fue realizada sin la presencia de personas en el terreno analizar.

Para poder constatar los resultados de la imagen obtenida y entender lo que se presenta en ella, se dibujó un bosquejo del lugar solo con los elementos importantes dentro de la escena, como lo son una serie de palmeras ubicadas en ese lugar y unas bancas fabricadas de cemento. Esto fue necesario ya que no se estaba en posesión de un sistema o herramienta que permitiera tomar una fotografías de la zona a una altura tal que abarcara todo el terreno analizado. El bosquejo fue escalado a las mismas dimensiones de la imagen que entrega el algoritmo de focalización utilizado. Es importante destacar que las dimensiones de las palmeras y las bancas fueron aumentadas en cierto factor para mejorar la comprensión de los resultados, ver Figura 3-44.

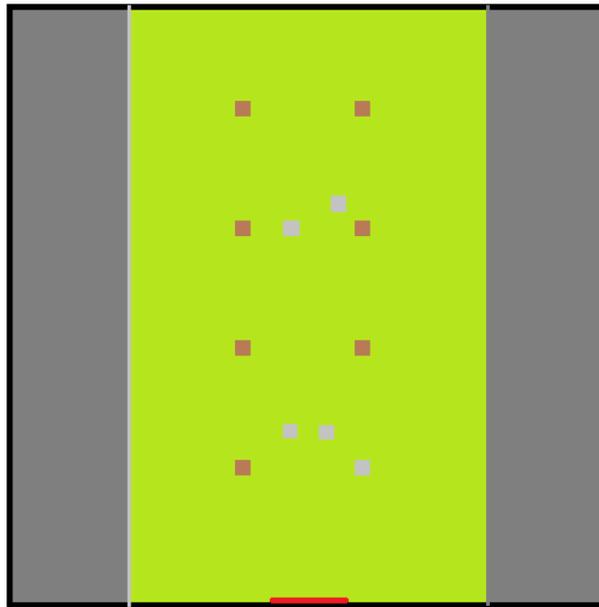


Figura 3-44: Bosquejo del área verde analizada, en rojo se observa la trayectoria realizada por el radar. Al centro en café, se observa la ubicación de las palmeras y en gris la ubicación de las bancas de cemento.

El resultado de la imagen obtenida se puede observar en la Figura 3-45, la cual posteriormente fue superpuesta en la Figura 3-46.

Se puede apreciar en la Figura 3-46 que en comparación a las imágenes SAR generadas anteriormente, esta contiene menor interferencia o ruido que las demás, si bien se logra disminuir la interferencia que se generaba en las pruebas anteriores, se mantiene cierto factor de error causado por la longitud del riel, ya que siguen apareciendo ciertos puntos desconocidos en la imagen, algunos de una intensidad importante. Pese a esto se logra una imagen de fácil interpretación una vez que se superponen ambas imágenes, en la cual se puede identificar fácilmente los elementos existentes en ese lugar.

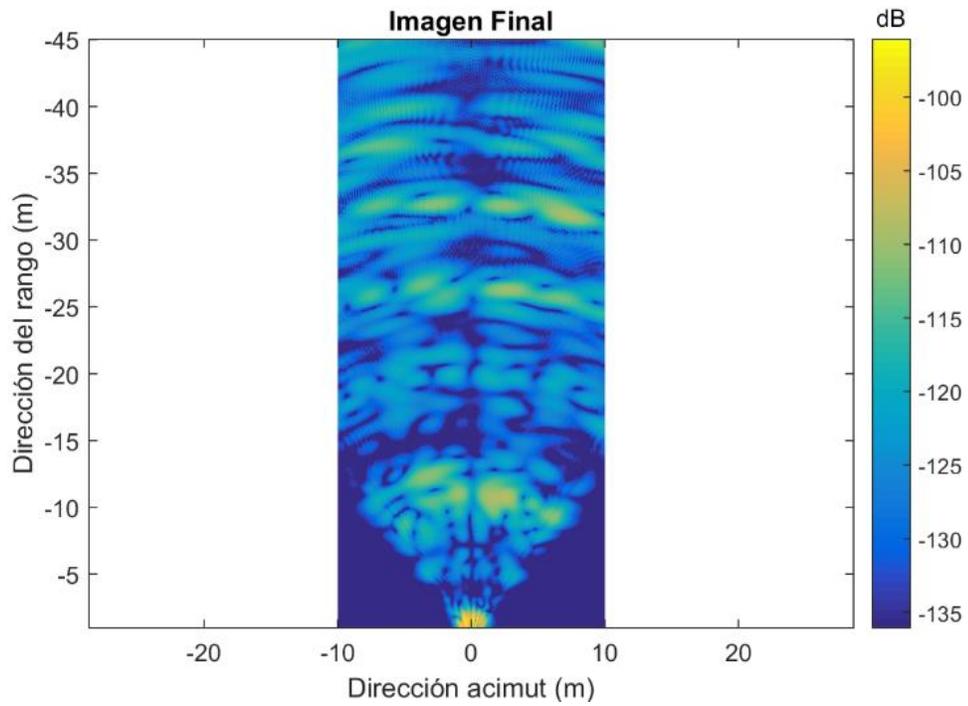


Figura 3-45: Imagen SAR generada de la prueba "outdoor" realizada a fuera de la Facultad de Ingeniería.

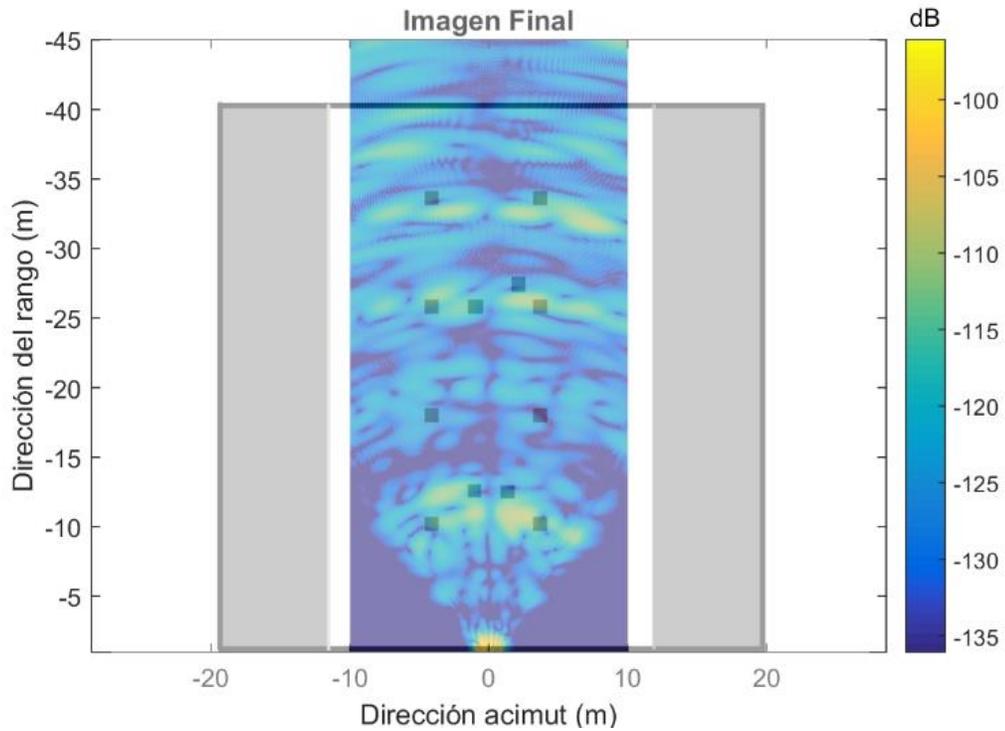


Figura 3-46: Comparación de la Imagen SAR obtenida de la prueba "outdoor" con el bosquejo diseñado del lugar.

# Conclusiones

El uso de imágenes por Radar de Apertura Sintética (SAR) se ha expandido considerablemente a través de numerosas aplicaciones de percepción remota. Este tipo de sistema permite observar procesos dinámicos que tienen un lugar en la superficie terrestre, y que tienen impacto en distintas áreas, como el mapeo y monitoreo de la vegetación, la hidrología, hielo marino y geología, entre otros.

Es por esto, que en este trabajo se realiza un exhaustivo análisis del radar LFM-CW desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) al igual que su fabricación, buscando entender su funcionamiento y como este tipo de radar es capaz de generar imágenes de un lugar o sector en específico y aportar a las numerosas aplicaciones de percepción remota que se necesitan hoy en día.

Se requiere dos procesos para producir una imagen SAR: el primero de ellos es la adquisición y almacenamiento de datos del lugar y en segundo lugar el procesamiento de cada uno de esos datos a través de un algoritmo de focalización de imágenes.

Para cumplir este objetivo, en primer lugar fue necesario analizar el principio de funcionamiento del radar LFM-CW, identificar las distintas señales de interés del radar, el balance DC de este radar y sus parámetros de desempeño. De esta forma logrando dar una mirada más consistente y más profunda a sus características y parámetros de desempeño, permitiendo a la vez realizar mejoras en el sistema, específicamente en el sub-sistema de antenas del radar, diseñando dos antenas Yagi impresas que proveen al sistema de mejor ganancia, de mayor ancho de banda y mejor directividad, logrando aumentar las características de los parámetros de desempeño de este radar.

Luego se dio a conocer la fabricación de este sistema basándose en [21], [22]. Donde se describe detalladamente la construcción de este radar, identificando sus diferentes bloques de funcionamiento y circuitos diseñados para cada uno de ellos, los principales componentes y el funcionamiento.

También se dio a conocer el paso a paso de la metodología utilizada para la obtención de imágenes tipo SAR con este radar, partiendo de lo más básico a lo más complejo, como por ejemplo, la sincronización de las señales modulador/riel al momento de realizar la adquisición

de imágenes del objetivo. Facilitando su uso al momento de operarlo o bien ayudar al entendimiento del funcionamiento del radar y las consideraciones que se deben tener al momento de utilizarlo.

Luego en segundo lugar en base a la focalización de imagen se dio a conocer el algoritmo utilizado en este trabajo. El cual consiste en el Algoritmo de Migración de Rango o por sus siglas en inglés RMA, ya que es uno de los que cumple de mejor forma con las características necesarias para el procesamiento de este tipo de datos. Una de las principales ventajas que tiene este algoritmo en comparación con los demás existentes es que los frentes de ondas que se producen luego del procesamiento de la señal no son planas, lo que permite evitar el “Defocus” y la distorsión geométrica de la imagen final [35]. Otro beneficio que nos entrega este algoritmo es que el tiempo que se demora en procesar los datos en comparación con los recursos que exige para su procesamiento es bastante bajo.

Respecto a los resultados obtenidos, se puede decir que la calidad y por ende una fácil interpretación de las imágenes obtenidas depende de una serie de factores, entre ellos los más importantes son: las características físicas del entorno, las diferentes señales que pueden existir en el lugar, el largo riel de desplazamiento y el coeficiente de retrodispersion de los elementos en la zona, ya que si en la zona a iluminar hay solo elementos que tenga un coeficiente de retrodispersion inferior a lo que puede detectar el radar no importará la resolución que tenga el sistema SAR será imposible generar una imagen que sea congruente con la zona iluminada.

El principal problema que existió al momento de adquirir los datos en las pruebas realizadas y que provocara que las imágenes generadas no fueran tan limpias radica principalmente en que el desplazamiento del radar no fuera constante. Ya que el riel de desplazamiento no poseía las medidas óptimas para lograr una correcta adquisición de datos, lo cual se pudo resolver colocando el riel sobre una base movable, lo que permitió solucionar este problema pero a la vez agrego este factor de error ya que el desplazamiento del radar ya no era totalmente constante como se explicó anteriormente. Pese a esto se logró generar imágenes tales que al momento de constatarlas con el plano arquitectónico o bosquejo del lugar efectivamente correspondían a lo esperado. Esto nos indica que el radar fabricado cumple con éxito lo esperado que es generar imágenes tipo SAR de una zona u objetivo en específico.

De esta manera, se han cumplido con éxito los objetivos del proyecto como lo son el análisis y fabricación de un sistema de generación de imágenes basadas en radar, a través del análisis de sus diferentes características y fabricación, no obstante, existen una serie de elementos que se pueden mejorar en el Radar LFM-CW fabricado, dando pie a una gran cantidad de trabajo futuro a proponer.

### Trabajos a futuro

- Fabricar un riel para el desplazamiento del radar mínimo de 2,40 [m] para evitar problemas de adquisición de datos.
- Mejorar la fuente de energía del radar, reemplazando el banco de baterías AA, por un arreglo de baterías de litio o similar.
- Fabricar una carcasa de metal especial para el radar y así evitar interferencias externas.
- Agregar un dispositivo de comunicación remota radar/PC o bien tener un dispositivo de grabación externa.
- Adecuar el sistema para ser montado sobre un drone y así para poder realizar pruebas aéreas sobre una zona.
- Generar una interfaz gráfica con algún software en tiempo real para adquirir la posición o velocidad de un objeto.

# Bibliografía

- [1] A. J. Lewis y F. M. Henderson, *Principles and Applications of imaging radar*, United States: John Wiley and Sons, 1998.
- [2] R. Bamler y H. Runge, «A Novel High Precision SAR Focusing Algorithm Based on Chirp Scaling,» de *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1992. IGARSS '92. International*, Houston, 1992.
- [3] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, New York: Wiley-Interscience publication, 1999.
- [4] C. Wu, «A Digital System to Produce Imagery from SAR Data,» de *System Design Driven by Sensors*, California, 1976.
- [5] C. Cafforio, C. Prati y F. Rocca, «SAR data focusing using seismic migration techniques,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 27, n° 2, pp. 194-207, Marzo 1991.
- [6] R. Bamler, «A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 4, p. 706-713, 1993.
- [7] A. J. Zozaya, «Radares de apertura sintética: Procedimiento de diseño,» *INGENÍERIA UC*, vol. 23, n° 2, pp. 97-115, 2016.
- [8] V. C. Koo, «A New unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar for environmental monitoring,» *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp. 245-268, 2012.
- [9] V. C. Koo, «The masar project: Desing and development,» *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 50, pp. 279-298, 2005.

- 
- [10] T. G. H. Bennett, «Development of a parallel sar processor on a beowulf cluster,» Cape Town, 2003.
- [11] J. M. Webster, «The development of a radar digital unit for the sar,» Cape Town, 2004.
- [12] G. L. Charvat, *Small and Short-Range Radar Systems*, New York: CRC Press, 2014.
- [13] J. C. Curlander y R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, United States: Wiley, John & Sons, 1991.
- [14] A. Moreira, «Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications,» de *4th Advanced training course in land remote sensing*, Athens, 2013.
- [15] M. E. Buemi, «Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética median te filtros stack,» Buenos Aires, 2012.
- [16] M. I. Skolnik, *Radar handbook*, New York: McGraw-Hill, 2008.
- [17] M. A. Richards, W. A. Holm y J. A. Scheer, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, vol. 1, SciTech, 2010.
- [18] C. Wolf, «Radar tutorial,» Berlin, 1996.
- [19] A. J. Zozaya, «Análisis del radar LFM-CW del MIT,» Quito, 2016.
- [20] M. S. Nogués, «Formación de imágenes Radar de Apertura Sintetica (SAR) de precisión mediante técnicas de retroproyección.,» Catalunya, 2015.
- [21] G. L. Charvat, «Mit iap 2011 laptop based radar: Block diagram, schematics, bill of material, and fabrication instructions. Build a small radar system capable of sensing range, doppler, and synthetic aperture radar imaging,» de *MIT Independent Activities*, Boston, 2011.
- [22] G. L. Charvat., «Synthetic aperture radar (sar) experiment using the mit iap 2011 laptop based radar. build a small radar system capable of sensing range, doppler and synthetic aperture radar imaging,» de *MIT Independent Activities*, Boston, 2011.
- [23] Exar, «EXAR Corporation,» February 2008. [En línea]. Available: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206\\_104\\_020808.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf). [Último acceso: June 2017].
- [24] Maxim, «Maxim Integrated Products,» june 2009. [En línea]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX410-MAX414.pdf>. [Último acceso: june 2017].

- [25] T. Instruments, «Texas Instruments Corporation,» december 2014. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2940c.pdf>. [Último acceso: june 2017].
- [26] A. Meta, «Signal Processing of FMCW Synthetic Aperture Radar Data.,» Netherlands, 2006.
- [27] Minicircuits, «Minicircuits Corporation,» March 2013. [En línea]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX95-2536C+.pdf>. [Último acceso: june 2017].
- [28] Minicircuits, «Minicircuits Corporation,» March 2013. [En línea]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/VAT-3+.pdf>. [Último acceso: 2017 June].
- [29] Minicircuits, «Minicircuits Corporation,» March 2013. [En línea]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-272LN+.pdf>. [Último acceso: june 2017].
- [30] Minicircuits, «Minicircuits Corporation,» February 2013. [En línea]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX10-2-42+.pdf>. [Último acceso: june 2017].
- [31] Minicircuits, «Minicircuits Corporation,» june 2013. [En línea]. Available: [http://www.ece.usu.edu/ece\\_store/spec/ZX05-43MH+.pdf](http://www.ece.usu.edu/ece_store/spec/ZX05-43MH+.pdf). [Último acceso: june 2017].
- [32] E. Á. Navarro, J. Blanes, J. Carrasco y C. Reig, «A new bi-faced log periodic printed antenna,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, nº 9, pp. 2174-2178, September 2007.
- [33] E. A. Navarro, «Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas,» Elche, 2008.
- [34] R. Salas, J. F. Pérez y J. Ramírez, «Tecnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos,» Mérida, 2008.
- [35] W. G. Carrara, R. S. Goodman y R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, London: Artech House, 1995.
- [36] G. L. Charvat., «Doppler experiment using the mit iap 2011 laptop based radar. Build a small radar systemcapable of sensing range, doppler, and synthetic aperture radar imaging,» 2011.
- [37] M. P. Zénere, «Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y validación,» Cordoba, 2012.

# A Apéndice

## A.1 Presupuesto de los componentes del circuito

Componente	cantidad	Empresa	Costo unitario(\$)	Sub total(\$)
ZX95-2536-S+ (VCO)	2	Min-Circuits	44,95	88,90
VAT-3+(ATT)	1	Min-Circuits	13,95	13,95
ZX60-272LN-S+(PA/LNA)	2	Min-Circuits	69,95	139,9
ZX10-2-42-S+(SPLTR)	1	Min-Circuits	34,95	34,95
ZX05-43MH-S´+(MIX)	2	Min-Circuits	46,45	92,20
SMA M-M Barrels	4	Min-Circuits	5,95	23,80
6" SMA M-M Cables	3	Min-Circuits	12,95	38,85
XR-2206(CI-Modulador)	1	Jameco	7,95	7,95
Battery pack	2	Jameco	2,49	4,98
MAX414CPD+-ND(CI-AO)	1	Digi-Key	6,36	6,36
SA105A102JAR (1000 pf, 5%)	4	Digi-Key	0,4	1,6
MFR-25FBB-8K45 (8450 ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-102K(102k ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-7K15(7150 ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-1K00(7150 ohm, 1%)	3	Digi-Key	0,1	0,3
PPC12.1KZCT-ND(12,1K ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,29	0,58
MFR-25FBB-17K4(17,4k ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-28K0(28,0K ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-4K12(4,12K ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
MFR-25FBB-1K05(1620 ohm, 1%)	2	Digi-Key	0,1	0,2
LM2940CT (5V Regulador)	2	Digi-Key	1,68	3,36
BC1150CT-ND(0,47 uf)	2	Digi-Key	0,36	0,72
K104Z15Y5VE5TH5(0,1 uf)	2	Mouser	0,29	0,58
UVR1E101MED1TD(100 uf)	2	Mouser	0,3	0,6

**A Apéndice**

3296W.103LF-ND(10K Trimmer)	1	Mouser	2,41	2,41
CFP1/4CT52E201J(200 ohm;5%)	2	Mouser	0,33	0,66
3296W-1-205LF(2M Trimmer)	2	Mouser	2,41	4,82
PV36W503C01B00(50K Trimmer)	2	Mouser	1,5	3,00
UVR1H010MDD1TA(1 uf, Electrolítico)	2	Mouser	0,24	0,48
UVR1H100MDD1TD(10 uf, Electrolítico)	2	Mouser	0,26	0,52
MF1/4DCT52R5101F(5,1K ohm, 1%)	2	Mouser	0,23	0,46
CCF0710K0JKE36(10K ohm, 1%)	2	Mouser	0,1	0,2
TLHR5400(Diodo Led Rojo)	2	Mouser	0,42	0,84
CCF071K00K-E3(1K ohm, 1%)	1	Mouser	0,1	0,1
CCF60-100K-E3(100K ohm, 1%)	2	Mouser	0,25	0,5
5053HD47K00F(47K ohm,1%)	12	Mouser	0,17	2,04
80-R82CC4100AA60J(1 uf, 5%)	2	Mouser	0,67	1,34
172-2236(3,5 plug Stereo)	1	Mouser	3,36	3,36
SMA F bulkhead	2	Mouser	6,65	13,3
Costo de envío x4				60
Total				US(\$) <b>555</b>

Tabla\_apéndice A-1: Presupuesto de todos los componentes utilizados en la fabricación del circuito.

# B Apéndice

A continuación se presenta el código completo de la programación en MATLAB del algoritmo RMA [35].

- Pre-procesamiento

Listado\_apéndice B-1: Código utilizado en MATLAB para realizar el Pre-procesamiento de la señal y la formación de la imagen.

```
1 %MIT IAP Radar Course 2011
2 %Resource: Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler,
3 %and Synthetic Aperture Radar Imaging
4 %
5 %Gregory L. Charvat
6
7 %Algoritmo SAR basado en:
8 %Range Migration Algorithm from ch 10 of Spotlight Synthetic Aperture Radar
9 %Signal Processing Algorithms, Carrara, Goodman, and Majewski
10
11
12 %NOTA:Configurar la salida del circuito modulador (up-Chirp) entre 2 y 3.2V
13 %aproximadamente para que el radar este trabajando en la banda ISM. Cambiar
14 %el fstar y el fstop cuando se este trabajando en esta banda.
15
16 %PRE-PROCESAMIENTO
17
18
19 %-----%
20
21 clear all;
22 close all;
23
24
25 %-----%
26 %Se leen los datos crudos o raw data.wav
27 [Y,FS] = audioread('towardswarehouse.wav');
28
29
30 %Constante
31 c = 3E8; %(m/s) velocidad de la luz
32
33 %Parámetros del radar
34 Tp = 20E-3; %(s) tiempo del pulso (up-chirp)
35 Trp = 0.25; %(s) tiempo de duración del perfil del rango mínimo
36 N = Tp*FS; %número de muestras por pulso
37 %fstart = 2260E6; %(Hz) LFM frecuencia inicial (0v)
38 %fstop = 2590E6; %(Hz) LFM frecuencia final (5v)
39 fstart = 2402E6; %(Hz) LFM frecuencia inicial para banda ISM (2v)
40 fstop = 2495E6; %(Hz) LFM frecuencia final para banda ISM (3.2v)
41 BW = fstop-fstart; %(Hz) Ancho de banda
```

```

42 f = linspace(fstart, fstop, N/2); %Frecuencia instantanea a transmitir
43
44
45
46 %La entrada parece estar invertida
47 trig = -1*Y(:,1);
48 s = -1*Y(:,2);
49 clear Y;
50
51
52 %-----%
53 %Creaciónn de la matriz RAW o de datos crudos
54
55 %se analizan los datos por posición (primera etapa)
56 rpstart = abs(trig)>mean(abs(trig));
57 count = 0;
58 Nrp = Trp*FS; % número mínimo de muestras entre pefiles de rango
59
60
61 for ii = Nrp+1:size(rpstart,1)-Nrp
62     if rpstart(ii) == 1 && sum(rpstart(ii-Nrp:ii-1)) == 0
63         count = count + 1;
64         RP(count,:) = s(ii:ii+Nrp-1); %se genera una fila para cada eco recibo
65         RPtrig(count,:) = trig(ii:ii+Nrp-1);
66     end
67 end
68
69 %se analizan los datos por pulso(segunda etapa)
70 count = 0;
71 thresh = 0.08;
72 clear ii;
73
74
75 for jj = 1:size(RP,1)
76     SIF = zeros(N,1);
77     start = (RPtrig(jj,:) > thresh);
78     count = 0;
79     jj;
80     for ii = 12:(size(start,2)-2*N)
81         [Y, I] = max(RPtrig(jj,ii:ii+2*N));
82         if mean(start(ii-10:ii-2)) == 0 && I == 1
83             count = count + 1;
84             SIF = RP(jj,ii:ii+N-1)' + SIF; %se genera las filas de la matriz
85                                     %con el número de muestras correctas
86         end
87     end
88     %Transformada de Hilbert
89     q = ifft(SIF/count);
90     sif(jj,:) = fft(q(size(q,1)/2+1:size(q,1)));
91 end
92 sif(find(isnan(sif))) = 1E-30; %se establecen todos los valores Nan a 0
93
94
95 %se procede a guardar los datos a procesar en s
96 clear s;
97 s = sif;
98
99 save ('routsidewarehouse2 s'); %se guardan los datos complejos en una matriz
100 externa
101
102
103 %-----%
104
105 %Se cargan las variables recién creadas referidas a la matriz de datos crudos
106 %y se configuran nuevamente las variables del radar para asegurar que
107 %ninguna de ellas se haya perdido o cambiado su valor
108
109
110
111 clear all;
112 c = 3E8; %(m/s) velocidad de la luz

```

```

113
114 %se carga la variable sif de la imagen de datos guardados
115
116
117 load ('routsidewarehouse2 s');
118
119 for ii = 1:size(s,1)
120     s(ii,:) = s(ii,:) - mean(s,1);%se le quita la componente continua a
121                                     %cada uno de estos valores guardados
122 end
123
124
125 sif = s; %Se guardan nuevamente los datos crudos en sif
126 clear s;
127 clear sif_sub;
128
129 %*****
130 %Parámetros del radar
131 fc = (2495E6 - 2402E6)/2 + 2402E6; %frecuencia central del radar
132 B = (2495E6 - 2402E6); % (hz) ancho de banda
133 cr = B/20E-3; % (Hz/sec) chirp rate
134 Tp = 20E-3; % (sec) tiempo del pulso
135 Rs = (12+9/12)*.3048; % (m) Se indica la distancia RS aproximada a la que
136                                     %está el radar con el centro de la escena
137 %Rs=0;
138 Xa = 0; % (m) se crea el parámetro inicial donde se fija la apertura de la antena
139 delta_x = 2*(1/12)*0.3048; % (m) cada cuanto se captura un perfil del objetivo
140 L = delta_x*(size(sif,1)); % (m) longitud de la apertura
141 Xa = linspace(-L/2, L/2, (L/delta_x)); % (m) Posición acimut del radar con una
142     apertura L
143 Za = 0;
144 Ya = Rs;
145 t = linspace(0, Tp, size(sif,2)); % (s) Tiempo rápido, muestras por pulsos
146
147
148 %vector que considera la trayectoria del radar en acimut
149 Kr = linspace(((4*pi/c)*(fc - B/2)), ((4*pi/c)*(fc + B/2)), (size(t,2)));
150
151 %Se guardan los parámetros y calibraciones previamente realizadas
152 save ('sif sif delta_x Rs Kr Xa');
153 clear all;
154
155
156 run IFP
157 IFP;
158

```

- Formación de imagen

```

1 %
2 %Este Algoritmo RMA fue escrito por Gregory L. Charvat como parte de su
3 %disertación:
4 %G. L. Charvat, "A Low-Power Radar Imaging System," Ph.D. dissertation,
5 %Dept. of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East
6 %Lansing, MI, 2007.
7 %
8 %
9 %Algoritmo SAR basado en:
10 %Range Migration Algorithm from ch 10 of Spotlight Synthetic Aperture Radar
11 %Signal Processing Algorithms, Carrara, Goodman, and Majewski
12 %
13
14 %*****
15 %NOTA: la matriz de datos crudos es sif(Xa,t)
16
17
18 clear all;
19 load sif;
20
21

```

```

22 %Se le aplica la ventana de Hanning a los datos (sif) en primer lugar
23 N = size(sif,2);
24 for ii = 1:N
25     H(ii) = 0.5 + 0.5*cos(2*pi*(ii-N/2)/N); %función de hanning en función
26 end %del número de columnas de sif
27 % (número de muestras por pulso)
28
29 for ii = 1:size(sif,1)
30     sif_h(ii,:) = sif(ii,:).*H; %se multiplica cada fila de la matriz por la
31 %función de Hanning
32 end
33 sif = sif_h; %se guardan los datos modificados
34
35
36 figcount = 1;
37 close_as_you_go = 0;
38 do_all_plots = 0;
39
40 set(0,'defaultaxesfontsize',13); % se establece el tamaño de la fuente
41 %utilizada en los plots
42
43
44 % NOTA: la función 'dbv.m' es dataout = 20*log10(abs(datain));
45 %*****
46 if do_all_plots == 1,
47     figure(figcount);
48     S_image = angle(sif);
49     imagesc(Kr, Xa, S_image);
50     colormap(gray);
51     title('Fase antes de aplicarle FFT al eje acimut');
52     xlabel('K_r (rad/m)');
53     ylabel('Posicion de Apertura Sintética, Xa (m)');
54     cbar = colorbar;
55     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'radians','fontsize',13);
56     print(gcf, '-djpeg100', 'fase_antes_fft_acimut.jpg');
57     if close_as_you_go == 1,
58         close(figcount);
59     end
60     figcount = figcount + 1;
61 end
62
63 %FFT a largo del barrido realizado (tiempo lento)
64 zpad = 2048; %rango cruzado o acimut simetrico respecto al desplazamiento
65 szeros = zeros(zpad, size(sif,2));%se crea una matriz de ceros
66 for ii = 1:size(sif,2)
67     index = round((zpad - size(sif,1))/2);
68     %se mueven los valores de sif alcentro de la matriz de ceros
69     szeros(index+1:(index + size(sif,1)),ii) = sif(:,ii);
70 end
71 sif = szeros; %se guardan los valores de szeros en sif
72 clear ii index szeros;
73
74
75
76 S = fftshift(fft(sif, [], 1), 1);%se le aplica la DFT a las columnas de sif
77 %y luego se reordenan dejando el valor mas
78 %bajo al centro de la matriz
79
80 clear sif;
81 Kx = linspace((-pi/delta_x), (pi/delta_x), (size(S,1)));
82
83 if do_all_plots == 1,
84     figure(figcount);
85     S_image = dbv(S);
86     imagesc(Kr, Kx, S_image, [max(max(S_image))-40, max(max(S_image))]);
87     colormap(gray);
88     title('Magnitud después de aplicarle FFT al eje acimut');
89     xlabel('K_r (rad/m)');
90     ylabel('K_x (rad/m)');
91     cbar = colorbar;
92     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'dB','fontsize',13);

```

```

93     print(gcf, '-djpeg100', 'mag_después_fft_acimut.jpg');
94     if close_as_you_go == 1,
95         close(figcount);
96     end
97     figcount = figcount + 1;
98 end
99
100 if do_all_plots == 1,
101     figure(figcount);
102     S_image = angle(S);
103     imagesc(Kr, Kx, S_image);
104     colormap(gray);
105     title('Fase después de aplicarle FFT al eje acimut');
106     xlabel('K_r (rad/m)');
107     ylabel('K_x (rad/m)');
108     cbar = colorbar;
109     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'radians','fontsize',13);
110     print(gcf, '-djpeg100', 'fase_después_fft_acimut.jpg');
111     if close_as_you_go == 1,
112         close(figcount);
113     end
114     figcount = figcount + 1;
115 end
116
117 if do_all_plots == 1,
118     figure(figcount);
119     S_image = dbv(fftshift(fft(S, [], 2), 2));
120     imagesc(linspace(-0.5, 0.5, size(S, 2)), Kx, S_image, [max(max(S_image))-40,
121 max(max(S_image))]);
122     colormap(gray);
123     title('Magnitude of 2-D FFT of Input Data');
124     xlabel('R_{relative} (dimensionless)');
125     ylabel('K_x (rad/m)');
126     cbar = colorbar;
127     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'dB','fontsize',13);
128     print(gcf, '-djpeg100', 'mag_after_2D_fft.jpg');
129     if close_as_you_go == 1,
130         close(figcount);
131     end
132     figcount = figcount + 1;
133 end
134
135
136
137
138 %*****
139 %matched filter o filtro adaptado
140
141 %se crea el filtro adaptado
142 for ii = 1:size(S,2) %se recorre cada una de las columnas para encontrar phi
143     for jj = 1:size(S,1) % se recorre cada una de las filas de la columna ii
144         %phi_mf(jj,ii) = -Rs*Kr(ii) + Rs*sqrt((Kr(ii))^2 - (Kx(jj))^2);
145         phi_mf(jj,ii) = Rs*sqrt((Kr(ii))^2 - (Kx(jj))^2);
146         Krr(jj,ii) = Kr(ii); %se genera Kr en 2D para luego poder graficarlo
147         Kxx(jj,ii) = Kx(jj); %se genera Kx en 2D para luego poder graficarlo
148     end
149 end
150 smf = exp(j*phi_mf); %%%%%%%%%%%
151
152
153 %nota, estamos en el dominio kx y kr, por lo tanto nuestra convención es
154 S_mf(Kx,Kr)
155
156 % se le aplica el filtro adaptado a S
157 S_mf = S.*smf;
158
159 clear smf phi_mf;
160
161
162 if do_all_plots == 1,
163

```

```

164     figure(figcount);
165     S_image = angle(S_mf);
166     imagesc(Kr, Kx, S_image);
167     colormap(gray);
168     title('Fase después de Matched Filter');
169     xlabel('K_r (rad/m)');
170     ylabel('K_x (rad/m)');
171     cbar = colorbar;
172     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'radians','fontsize',13);
173     print(gcf, '-djpeg100', 'fase_después_matched_filter.jpg');
174     if close_as_you_go == 1,
175         close(figcount);
176     end
177     figcount = figcount + 1;
178 end
179
180 clear S;
181
182
183 if do_all_plots == 0,
184     figure(figcount);
185     S_image = dbv(fftshift(fft(S_mf, [], 2), 2));
186     imagesc(linspace(-0.5, 0.5, size(S_mf, 2)), Kx, S_image, [max(max(S_image))-
187 40, max(max(S_image))] );
188     colormap(gray);
189     title('Magnitud luego de aplicarle FFT en 2D a los datos filtrados')
190     xlabel('R_{relative} (dimensionless)');
191     ylabel('K_x (rad/m)');
192     cbar = colorbar;
193     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'dB','fontsize',13);
194     print(gcf, '-djpeg100', 'mag_después_fft_downrange_fft_de _los
195 datos filtrados.jpg');
196     if close_as_you_go == 1,
197         close(figcount);
198     end
199     figcount = figcount + 1;
200 end
201
202
203
204
205 %*****
206 %Se realiza la interpolación de Stolt
207
208 %Para el análisis de datos
209 kstart =73; %para 2 a 4 Ghz
210 kstop = 108.5; %para 2 a 4 Ghz
211
212
213 %kstart = 42.5; para 1 a 3 Ghz
214 %kstop = 118.5; para 1 a 3 GHz
215
216
217 %kstart = 95;
218 %kstop = 102;
219
220 Ky_even = linspace(kstart, kstop, 1024);%crea un vector Ky espaciado de
221 %forma uniforme para interceptar
222 %datos reales.
223
224
225
226 clear Ky S_St;
227 %for ii = 1:size(Kx,2)
228 count = 0;
229 for ii = 1:zpad;
230 %for ii = round(.2*zpad):round((1-.2)*zpad)
231     count = count + 1;
232     Ky(count,:) = sqrt(Kr.^2 - Kx(ii)^2);
233     %S_st(ii,:) = (interp(Ky(ii,:), S_mf(ii,:), Ky_even)).*H;
234

```

```

235     S_st(count,:) = (interp1(Ky(count,:), S_mf(ii,:), Ky_even));
236 end
237 S_st(find(isnan(S_st))) = 1E-30; %set all Nan values to 0
238 clear S_mf ii Ky;
239
240 if do_all_plots == 0,
241     figure(figcount);
242     S_image = angle(S_st);
243     imagesc(Ky_even, Kx, S_image);
244     %imagesc(S_image);
245     colormap(gray);
246     title('Fase después de la Interpolación Stolt');
247     xlabel('K_y (rad/m)');
248     ylabel('K_x (rad/m)');
249     cbar = colorbar;
250     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'radians','fontsize',13);
251     print(gcf, '-djpeg100', 'Fase_después_interpolación_Stolt.jpg');
252     if close_as_you_go == 1,
253         close(figcount);
254     end
255     figcount = figcount + 1;
256 end
257
258
259 %apply hanning window to data, cleans up data ALOT
260 N = size(Ky_even,2);
261 for ii = 1:N
262     H(ii) = 0.5 + 0.5*cos(2*pi*(ii-N/2)/N);
263 end
264
265 for ii = 1:size(S_st,1)
266     S_sth(ii,:) = S_st(ii,:).*H;
267 end
268 %S_st = S_sth;
269
270
271 %*****
272 %Se realiza la Inversa de la Transformada de Fourier
273 %Nueva notación: v(x,y), donde x es el eje acimut
274
275 %Primero en la dimension del rango
276 clear v Kr Krr Kxx Ky_even;
277 v = ifft2(S_st, (size(S_st,1)*4), (size(S_st,2)*4));
278
279
280 %se fijan los extremos tanto del eje en dirección acimut como del rango en
281 %ft
282 %bw = (3E8/(4*pi))*(max(xx)-min(xx));
283 bw = 3E8*(kstop-kstart)/(4*pi);
284 max_range = (3E8*size(S_st,2)/(2*bw))*1/.3048;
285 figure(figcount);
286 S_image = v;
287 S_image = fliplr(rot90(S_image));
288 cr1 = -80; %(ft)
289 cr2 = 80; %(ft)
290 dr1 = 1 + Rs/.3048; %(ft)
291 dr2 = 350 + Rs/.3048; %(ft)
292
293 %Truncamiento de datos
294 dr_index1 = round((dr1/max_range)*size(S_image,1));
295 dr_index2 = round((dr2/max_range)*size(S_image,1));
296 cr_index1 = round((cr1+zpad*delta_x/(2*.3048))
297 / (zpad*delta_x/.3048))*size(S_image,2);
298 cr_index2 = round((
299 (cr2+zpad*delta_x/(2*.3048))/(zpad*delta_x/.3048))*size(S_image,2));
300 trunc_image = S_image(dr_index1:dr_index2,cr_index1:cr_index2);
301 downrange = linspace(-1*dr1,-1*dr2, size(trunc_image,1)) + Rs/.3048;
302 crossrange = linspace(cr1, cr2, size(trunc_image, 2));
303
304
305
306
307 %Se escala la dimension del rango de tierra a  $^{(3/2)}$ 

```

```
308
309
310     clear ii;
311     for ii = 1:size(trunc_image,2)
312         trunc_image(:,ii) = (trunc_image(:,ii)).*(abs(downrange*.3048)).^(3/2);
313     end
314     trunc_image = dbv(trunc_image); %Se agrega a escala d^(3/2)
315     imagesc(crossrange, downrange, trunc_image, [max(max(trunc_image))-40,
316 max(max(trunc_image))-0]);
317     colormap('default');
318     title('Imagen Final');
319     ylabel('Dirección del rango (ft)');
320     xlabel('Dirección acimut (ft)');
321     axis equal;
322     cbar = colorbar;
323     set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'dB','fontsize',13);
324     print(gcf, '-djpeg100', 'imagen_final.jpg');
325     if close_as_you_go == 1,
326         close(figcount);
327     end
328     figcount = figcount + 1;
```