



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño, simulación y prototipado de circuitos para el
conformado de señales RADAR

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Jacho Yugcha, Christian Alexander

Tutor/a: Balbastre Tejedor, Juan Vicente

Cotutor/a externo: CHUQUITARCO JIMENEZ, CARLOS ALEXANDER

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a aquellas personas que me han apoyado y prestado su ayuda en la recta final hacia mi titulación, agradecer a Juan Vicente Balbastre Tejedor por darme la oportunidad de realizar un Trabajo Fin de Grado de acuerdo con las preferencias que buscaba, además de contar con su buena organización durante todo el proceso. También debo agradecer a Carlos Alexander Chuquitarco Jiménez y Àngel Sánchez Navarro por su dedicación y tiempo. Desde el inicio hasta el final, su presencia y aliento han sido fundamentales para mi éxito. Por último, agradecer a mi familia, agradecerles su paciencia, amor incondicional y apoyo emocional. Han sido mi pilar en los momentos más difíciles y su confianza en mí ha sido mi mayor impulso. Su apoyo constante, ha sido esencial para mi crecimiento académico y personal. Este logro no hubiera sido posible sin su orientación. A todos ustedes, les dedico este logro con todo mi cariño y gratitud. Son mi equipo de apoyo y estoy eternamente agradecido por creer en mí y acompañarme en esta travesía académica.



Resumen

Este Trabajo Fin de Grado pretende validar mediante simulación un concepto de radar embarcado para una aeronave no tripulada capaz de detectar objetivos, con el fin de aportar información al piloto para facilitar la evitación de obstáculos. En los próximos años se prevé un gran aumento del uso de aeronaves, ya que se trata de herramientas aplicables a muchos sectores. La formulación y validación de este concepto contribuirá a mejorar la seguridad del tráfico aéreo. El concepto propuesto en este trabajo tiene en cuenta el alcance, velocidad y tipo de blanco a detectar. El diseño propuesto para la validación se basa en productos comerciales disponibles en el mercado de componentes y subsistemas electrónicos, así como en una antena radar monopulso desarrollada ad-hoc para este radar en otro trabajo fin de grado. La validación del concepto hace uso de software profesional de diseño electrónico. En este trabajo también se ha definido una estrategia para explotar los resultados obtenidos.

Resum

Aquest Treball Fi de Grau pretén validar mitjançant simulació un concepte de radar embarcat per a una aeronau no tripulada capaç de detectar objectius, amb la finalitat d'aportar informació al pilot per a facilitar l'evitació d'obstacles. En els pròxims anys es preveu un gran augment de l'ús d'aeronaus, ja que es tracta d'eines aplicables a molts sectors. La formulació i validació d'aquest concepte contribuirà a millorar la seguretat del trànsit aeri. El concepte proposat en aquest treball té en compte l'abast, velocitat i tipus de blanc a detectar. El disseny proposat per a la validació es basa en productes comercials disponibles en el mercat de components i subsistemes electrònics, així com en una antena radar monopuls desenvolupada ad hoc per a aquest radar en un altre treball fi de grau. La validació del concepte fa ús de programari professional de disseny electrònic. En aquest treball també s'ha definit una estratègia per a explotar els resultats obtinguts.

Abstract

This Final Degree Project aims to validate through simulation an on-board radar concept for an unmanned aircraft capable of detecting targets, in order to provide information to the pilot to facilitate obstacle avoidance. In the coming years, the use of aircraft is expected to increase significantly, as these tools are applicable to many sectors. The formulation and validation of this concept will contribute to improving air traffic safety. The concept proposed in this work takes into account the range, speed and type of target to be detected. The design proposed for the validation is based on commercial products available on the market for electronic components and subsystems, as well as on a monopulse radar antenna developed ad-hoc for this radar in another final degree project. The validation of the concept makes use of professional electronic design software. A strategy for exploiting the results obtained has also been defined in this work.



Índice

Capítulo 1. Introducción y objetivos	1
1.1 Contextualización	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organización del trabajo	3
1.3.1 Lista de tareas	3
1.3.2 Diagrama de Gantt.....	3
Capítulo 2. Sistemas Radar.....	4
2.1 Introducción y funcionamiento	4
2.2 Aplicaciones.....	5
2.3 Clasificación.....	6
2.3.1 Según la frecuencia de trabajo.....	6
2.3.2 Según el número de antenas	8
2.3.4 Según su tipo de modulación	9
2.3.5 Según la forma de onda	9
2.4 Radar de onda pulsada.....	10
2.4.1 Definición y funcionamiento	10
2.4.2 Parámetros fundamentales de un radar pulsado	10
2.4.3 Frecuencia de Repetición de Pulsos.....	11
2.4.4 Radares coherentes e incoherentes	13
2.4.5 Ciclo de trabajo.....	13
2.5 Radar de onda continua.....	14
2.5.1 Definición	14
2.5.2 Parámetros fundamentales y funcionamiento de un radar FMCW.....	14
2.6. Clasificación de los objetivos a detectar.....	19
Capítulo 3. Diseño previo (FMCW a 24GHz).....	20
Capítulo 4. Alternativas y posibles soluciones.....	22
Capítulo 5. Estudio de mercado	24
Capítulo 6. Implementación por software.....	28
6.1 Software	28
6.1.1 Microwave Office.....	28
6.1.2 Software AWR Virtual System Simulator (VSS)	28
6.1.3 Ventajas de AWR VSS.....	28



6.2 Diseño radar FMCW a 2.4 GHz	29
6.3 Diseño radar FMCW a 9.5 GHz	33
Capítulo 7. Resultados	35
Capítulo 8. Consideraciones y Conclusiones.....	42
8.1 Consideraciones del diseño	42
8.2 Conclusiones.....	43
Capítulo 9. Líneas futuras.....	44
Capítulo 10. Relación del trabajo con los ODS de la agenda 2030.....	45
Capítulo 11. Bibliografía	47

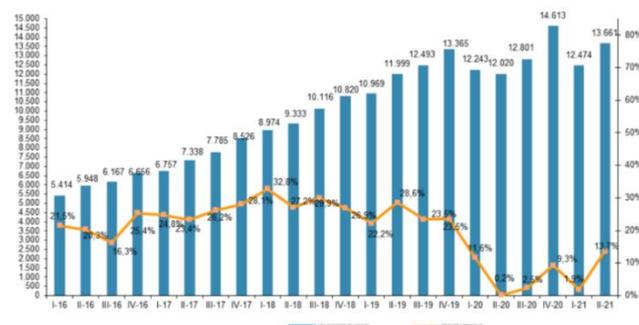
Capítulo 1. Introducción y objetivos

El ser humano ha ido evolucionando a medida que las necesidades del contexto histórico lo han requerido. La necesidad de conocer lo desconocido nos ha llevado a grandes innovaciones como el radar, permitiendo que el ser humano sea capaz de obtener información detallada a nivel terrestre y aéreo. Actualmente las aplicaciones que se tiene de este concepto son inmensas en el ámbito aéreo debido a que es fundamental esta herramienta para garantizar la seguridad, eficiencia y el orden en la navegación de aeronaves. De esta forma, se ofrece un servicio a los controladores de tráfico aéreo de información crítica para que la toma de decisiones sea la adecuada y así conseguir un control idóneo del tráfico aéreo en tiempo real. Los radares embarcados han ido evolucionando a medida que la tecnología lo ha ido haciendo. Estos avances han permitido mejores características a la hora de poder implementar diseños, facilitando el proceso de montaje y de simulación. En el progreso de la electrónica y de la tecnología de antenas, se plantean nuevos retos en el ámbito de los radares embarcados en aeronaves, ya que aprovechan una variedad de componentes electrónicos y sistemas especializados para ofrecer mejores capacidades de detección y seguimiento de objetivos en el entorno aéreo. Desde el transmisor y receptor de radiofrecuencia hasta la antena, la unidad de procesamiento de señales y los sistemas de control, esta electrónica desempeña un papel crucial en la operación y el rendimiento de los radares embarcados en aeronaves.

1.1 Contextualización

El trabajo de fin de grado que se propone se basa en un trabajo previo realizado por un compañero en el que se pretendía formular y validar mediante simulación un concepto de radar embarcado para su uso en sistemas DAA en drones, en particular para el ámbito de los aerotaxis, ya que ofrecen un servicio de transporte alternativo bastante interesante que opera de manera similar a los taxis terrestres, pero en el ámbito aéreo. Este modo de transporte innovador es una alternativa para aquellas personas que quieran tener mayor agilidad a la hora de viajar o también en casos de emergencia en los que el acceso de vehículos convencionales sea un problema. Más allá de los aerotaxis, las aplicaciones de las aeronaves no tripuladas son inmensas, en especial para el ámbito de la mensajería, debido al aumento del comercio electrónico en estos últimos años. De hecho, la pandemia sufrida ha causado un aumento en la adopción del comercio electrónico, impulsado por la comodidad y la competencia de precios debido a la internacionalización, además de las mejoras en logística y entrega, las empresas de mensajería [18] han invertido mucha capital en infraestructura, tecnología y flotas de transporte con el objetivo de aumentar el número de envíos y mejorar los tiempos de entrega. [19]

EVOLUCIÓN TRIMESTRAL DEL VOLUMEN DE NEGOCIO DEL COMERCIO ELECTRÓNICO Y VARIACIÓN INTERANUAL (millones de euros y porcentaje)



Fuente: CNMC

Figura 1. Evolución del comercio electrónico [5].



Debido a todas las mejoras implantadas, la facturación del comercio electrónico creció en España un 13,7% interanual en el segundo trimestre de 2021, hasta alcanzar los 13.661 millones de euros, según los últimos datos de comercio electrónico disponibles en el portal CNMCDData.

Una manera de que este servicio mejore y aumente, es con la implantación de drones en el ámbito de la mensajería, para ello se necesitaría implementar un radar embarcado en la aeronave o en el dron orientado a la mensajería, capaz de distinguir una persona de un vehículo, con este paradigma se plantea realizar un radar embarcado en un dron o aeronave para la fácil detección de obstáculos y así incrementar la seguridad del tráfico aéreo, ya que con la recopilación de información que nos proporcionaría el radar, se podría anticipar a supuestas situaciones facilitando la toma de decisiones por parte del piloto.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la validación mediante software de un diseño radar con componentes reales a una frecuencia de 9.5 GHz (nivel de madurez tecnológica TRL2 [HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 General Annex G]), con el objetivo que se ha mencionado anteriormente: mejorar la seguridad de vehículos aéreos tripulados o no tripulados, dándoles la herramienta para localizar en el espacio aéreo vehículos de sus mismas características.

Para el diseño del radar se ha seleccionado componentes reales teniendo en cuenta su precio y su disponibilidad en el mercado. Los objetivos principales para el diseño del radar vienen definidos en gran medida a un trabajo fin de grado previo, “*Desarrollo de un concepto de radar para su integración en sistemas de Detect and Avoid de aeronaves no tripuladas*”, de Àngel Sánchez Navarro. Objetivos que se definen a continuación :

- Detección de blancos a una distancia de alrededor de 1500m.
- Implementación del radar con una antena de 13 dB de ganancia.
- Detección de blancos con una sección recta radar (RCS) de un aerotaxi (10 m²).
- Detección de blancos con una sección recta radar (RCS) de una persona (1 m²).
- Detección de blancos con una sección recta radar (RCS) de un dron pequeño (0.5m²).
- Detección de blancos a una velocidad de **25 km/h**.
- Procesado de señal para correcta verificación.
- Dimensiones razonables para una fabricación futura.
- Componentes reales económicos.

Capítulo 2. Sistemas Radar

2.1 Introducción y funcionamiento

Un radar es un sistema de origen militar, anterior a la II Guerra Mundial, capaz de detectar características de un blanco, tales como su velocidad o distancia, mediante el uso de ondas electromagnéticas. La operación de un radar implica tres procesos principales: transmisión, recepción y el procesamiento de la señal recibida. Su principal funcionamiento se basa en la emisión de ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio y se reflejan cuando encuentran un objeto, esta señal es procesada en la etapa de procesamiento, donde se mide el tiempo que tarda la señal en viajar hasta el objeto y regresar al radar. Mediante esta información se consigue determinar la distancia al objeto.

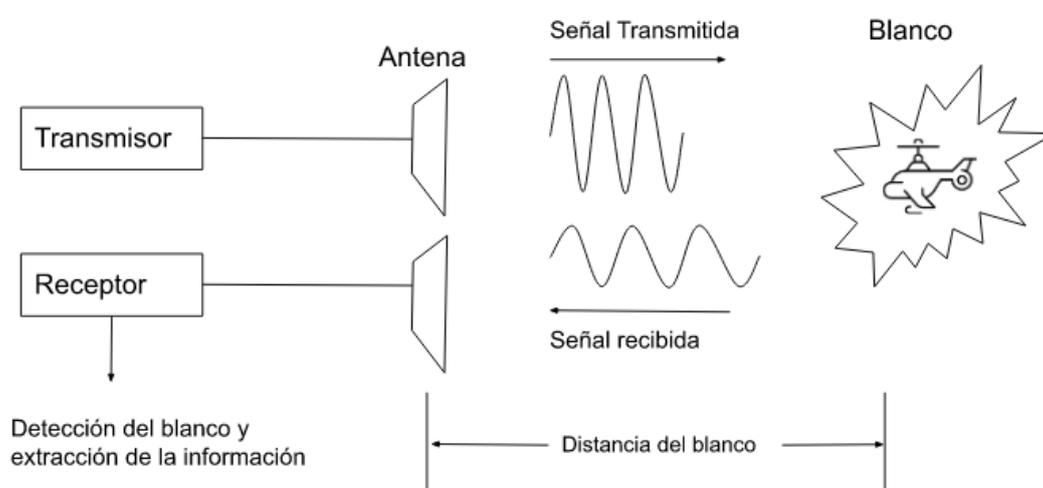


Figura 2. Diagrama básico de un radar.

Tal y como se puede observar en el diagrama, un radar se compone por tres procedimientos:

1. Transmisión: El radar emite ondas electromagnéticas (generalmente en la banda de radio o microondas) con algún tipo de modulación que viaja a través del espacio a la velocidad de la luz. Las ondas se emiten desde una antena direccional que apunta hacia el área que se va a escanear.
2. Recepción: Si la onda emitida choca con un objeto, parte de la energía se refleja y regresa al radar como un eco. La antena del radar recibe el eco y lo convierte en una señal eléctrica débil.
3. Procesamiento de señales: La señal que se recibe se amplifica, se filtra y la señal moduladora recibida se procesa para extraer información útil, como la distancia al objeto, la velocidad relativa y la dirección. Esto se logra mediante el análisis de la frecuencia, el tiempo de llegada y otros parámetros de la señal. La información se presenta al operador del radar en forma gráfica o alfanumérica.

2.2 Aplicaciones

Dentro de las diferentes aplicaciones de un sistema radar, éste puede ser utilizado para diversos fines, como la navegación aérea y marítima, la detección de objetos peligrosos, el control del tráfico aéreo.

Existen varias aplicaciones de radares, algunas de los más comunes son:

- Radar de vigilancia: este tipo de radar se utiliza para detectar y rastrear objetos en movimiento, como aviones, barcos, vehículos y personas.
- Radar meteorológico: se utiliza para medir distintos meteoros y predecir el tiempo atmosférico, detectando la presencia de precipitaciones y su intensidad, entre otros.
- Altímetro radar: este radar mide la altura de un objeto sobre una superficie como puede ser el terreno o sobre el agua.
- Radar de control de tráfico aéreo: se utiliza en el control de tráfico aéreo para ayudar a los controladores de tráfico aéreo a rastrear y dirigir a los aviones.
- Radar de imágenes: permite la creación de imágenes de alta resolución de objetos, lo que es útil para la navegación y la identificación de objetivos.
- Radar de detección de obstáculos: se utiliza en la industria del transporte para detectar objetos en el camino de los vehículos y evitar colisiones.
- Radar de seguimiento de vehículos: tiene una aplicación en el ámbito militar y civil para rastrear vehículos aéreos y de superficie.

Estos son solo algunos de los tipos de radares más comunes. Existen otros que se utilizan en diferentes campos y aplicaciones, cada uno con características específicas según su función.

Dentro del ámbito de la industria aeronáutica, existe un tipo de radar utilizado en los sistemas de detección y evitación (**DAA, del inglés , *Detect and Avoid Radar***), para detectar y evitar colisiones entre aeronaves en vuelo. El DAA radar utiliza una combinación de tecnologías para detectar y rastrear otras aeronaves en el aire, así como obstáculos en la trayectoria de las mismas, como edificios, terrenos, árboles y otros obstáculos. Esto supone diversas aplicaciones a la hora de poder embarcar un radar en una aeronave. Entre sus diversas funcionalidades, en este trabajo nos centraremos principalmente en las siguientes aplicaciones:

- Aeronaves, en especial los eVTOL (del inglés, electric vertical take-off and landing), es decir una aeronave eléctrica de despegue y aterrizaje vertical, similar a un helicóptero, pero mucho menos perjudicial para el medio ambiente, lo que lo convierte en un sistema ideal para el futuro de los taxis y la movilidad aérea urbana. Además, sus diversas funcionalidades los hacen muy interesantes en diferentes ámbitos como el de respuesta a emergencias para transportar víctimas, lo que los convierte en una herramienta muy útil para bomberos, médicos y policías.



Figura 3. Aeronave eVTOL.

- Drones de mensajería, capaces de poder facilitar el reparto y así mejorar el servicio. En este sector hay que destacar a Alphabet Drones, la empresa matriz de Google que ha comenzado un proyecto apodado “Project Wing”, con el objetivo de entregar comida y medicamentos en zonas rurales de Australia. Otro objetivo que se plantea es el de reducir las entregas aterrizando el dron, por lo que se intenta hacer las entregas en el aire a una altura de 50m.



Figura 4. Drones mensajeros.

La introducción de radares en estos sistemas facilitaría su funcionalidad y mejoraría la seguridad de todo su entorno. Este tipo de radar utiliza tecnología de radar de onda continua (CW) o radar de impulsos para detectar objetos en el camino de la aeronave, además de contar con otra tecnología como cámaras y sensores de luz para detectar objetos en el camino.

Una vez que se detecta un objeto, el DAA radar utiliza algoritmos de procesamiento de señales para calcular la distancia y la velocidad del objeto en relación con la aeronave. Luego, el sistema DAA fusiona esta información con la proporcionada por otros sensores y la para generar alertas de colisión y proporcionar información a los pilotos para evitar colisiones. Estos sistemas son especialmente útiles para aeronaves no tripulados (drones) que vuelan en el espacio aéreo compartido con aviones tripulados, ya que ayuda a evitar colisiones y refuerza la seguridad en el aire.

2.3 Clasificación

2.3.1 Según la frecuencia de trabajo

La frecuencia de trabajo con la que funciona un radar, determina su resolución. Por esa razón se distinguen diferentes bandas de trabajo para los sistemas radar, de esta forma se clasifica su aplicación para el que será utilizado.

Los radares también se pueden clasificar según su frecuencia de operación, y algunos de los tipos más comunes son:

1. Radar de banda HF: este tipo de radar opera en la banda de alta frecuencia, generalmente entre 3 y 30 MHz. Este tipo de radar se utiliza comúnmente para aplicaciones de vigilancia de larga distancia, como la detección de barcos y aeronaves en el mar.



2. Radar de banda VHF: este tipo de radar opera en la banda de muy alta frecuencia, generalmente entre 30 y 300 MHz. El radar de banda VHF se utiliza comúnmente en aplicaciones de control de tráfico aéreo, debido a su capacidad para detectar objetos a larga distancia.
3. Radar de banda UHF: este tipo de radar opera en la banda de ultra alta frecuencia, generalmente entre 300 y 1000 MHz. Los radares de banda UHF se utilizan comúnmente en aplicaciones militares, como la detección de aeronaves enemigas y la detección de misiles.
4. Radar de banda L: este tipo de radar opera en la banda de baja frecuencia, generalmente entre 1 y 2 GHz. Los radares de banda L se utilizan comúnmente en aplicaciones militares, como la vigilancia aérea y la detección de misiles.
5. Radar de banda S: este tipo de radar opera en la banda de frecuencia de 2 a 4 GHz. Los radares de banda S se utilizan comúnmente en aplicaciones de radar meteorológico y de vigilancia aérea.
6. Radar de banda C: este tipo de radar opera en la banda de frecuencia de 4 a 8 GHz. Los radares de banda C se utilizan comúnmente en aplicaciones de control de tráfico aéreo y en radares de navegación.
7. Radar de banda X: este tipo de radar opera en la banda de frecuencia de 8 a 12 GHz. Los radares de banda X se utilizan comúnmente en aplicaciones militares, de vigilancia y detección de objetos.
8. Radar de banda Ku: este tipo de radar opera en la banda de frecuencia de 12 a 18 GHz. Los radares de banda Ku se utilizan comúnmente en aplicaciones de radar meteorológico y de vigilancia aérea.
9. Radar de banda Ka: este tipo de radar opera en la banda de frecuencia de 26 a 40 GHz. Los radares de banda Ka se utilizan comúnmente en aplicaciones de radar meteorológico, de vigilancia y de detección de objetos.

DESIGNACION DE BANDA	RANGO DE FRECUENCIA (GHz)	LONGITUD DE ONDA (cm)
UHF	0.3 - 1.0	30 - 100
L	1.0 – 2.0	15 - 30
S	2.0 – 4.0	7.5 - 15
C	4.0 – 8.0	3.75 – 7.5
X	8.0 - 12.0	2.5 – 3.75
K _u	12.0 – 18.0	1.67 – 2.5
K	18.0 – 27.0	1.11 – 1.67
K _a	27.0 – 40.0	0.75 – 1.11
milimétrica	40.00 – 300.0	0.1 – 0.75

Tabla 3. Bandas de frecuencia.

En nuestro caso se va a plantear el diseño final en banda X, en especial en la banda de 9.5 GHz, dedicada a la radionavegación, apta para el uso Civil-Militar (CM).

BANDAS MHz	ATRIBUCIONES APLICADAS A ESPAÑA	USOS CNAF	USOS ANAF	OBSERVACIONES
8550-8650	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) RADIOLOCALIZACIÓN INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo) 5.469A	M R M	CM PM CM	UN-145 TLPR
8650-8750	RADIOLOCALIZACIÓN	R	PM	UN-145 TLPR
8750-8850	RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.470	R R	CM CM	UN-145 TLPR
8850-9000	RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN MARÍTIMA 5.472	R R	CM CM	UN-145 TLPR
9000-9200	RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA RADIOLOCALIZACIÓN 5.337 5.473A	R R	CM CM	UN-145 TLPR
9200-9300	RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN MARÍTIMA 5.474	R R	CM CM	UN-145 TLPR
9300-9500	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo) 5.427 5.474 5.475 5.475A	M R R M	CM CM CM CM	UN-145 TLPR
9500-9800	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo) 5.476A	M R R M	CM PM CM CM	UN-60 UN-86 UN-145 TLPR NM-47
9800-9900	RADIOLOCALIZACIÓN Exploración de la Tierra por satélite (activo) Fijo Investigación espacial (activo) 5.478A 5.478B	R M M M	PM CM CM CM	UN-145 TLPR
9900-10000	RADIOLOCALIZACIÓN Fijo 5.479	R M	CM CM	UN-145 TLPR

Tabla 4. Cuadro nacional de asignación de frecuencias en España [2].

2.3.2 Según el número de antenas

Los sistemas radar son sistemas que utilizan ondas electromagnéticas para detectar y localizar objetos en el espacio y se pueden clasificar según su número de antenas. Hay varios tipos de radar, y a continuación se describen tres de ellos:

- Radar monoestático: Este es el tipo de radar más común. En este sistema, la antena de transmisión y la antena de recepción están ubicadas en el mismo lugar. El radar monoestático es utilizado en aplicaciones como el control del tráfico aéreo, la navegación marítima y la detección de objetos en movimiento.
- Radar biestático: En este sistema, la antena de transmisión y la antena de recepción están ubicadas en lugares diferentes, y la señal de radar se transmite desde una antena y se recibe en otra. Este tipo de radar se utiliza en aplicaciones como la detección de objetos submarinos y la vigilancia de la frontera.
- Radar multi-estático: En este sistema, hay múltiples antenas de transmisión y recepción ubicadas en diferentes lugares. La señal de radar se transmite desde una antena y se recibe en varias antenas. Este tipo de radar se utiliza en aplicaciones como la detección de objetos en el espacio, la vigilancia de la frontera y la detección de objetos en el agua.



2.3.4 Según su tipo de modulación

Los radares pueden ser clasificados en diferentes tipos según su modulación. Algunos de los tipos más comunes son:

1. Radar pulso Doppler: Este tipo de radar utiliza la técnica Doppler para medir la velocidad de los objetos en movimiento. El radar envía pulsos de alta frecuencia y luego mide la frecuencia de la señal reflejada por los objetos en movimiento. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal reflejada se utiliza para determinar la velocidad del objeto en movimiento.
2. FMCW: La modulación de frecuencia continua (FMCW, del inglés frequency-modulated, continuous-wave) es una técnica de radar que modula la frecuencia de la señal transmitida de forma continua en un rango preestablecido. La señal reflejada es comparada con la señal transmitida y la diferencia de frecuencia se utiliza para determinar la distancia al objeto y la frecuencia Doppler. El FMCW es utilizado en radares de proximidad de vehículos, radares altimétricos, entre otros.
3. FSK: La modulación de frecuencia de desplazamiento (FSK, por sus siglas en inglés) es un tipo de radar que utiliza la frecuencia de la señal para representar los datos transmitidos. La frecuencia de la señal transmitida cambia entre dos valores para representar los datos. Este tipo de radar es comúnmente utilizado en sistemas de identificación amigo-enemigo (IFF, por sus siglas en inglés) y sistemas de radar de navegación.
4. UWB: Los radares de banda ultra ancha (UWB, por sus siglas en inglés) utilizan pulsos de corta duración y ancho de banda muy ancho para determinar la distancia y la posición de los objetos. Estos radares son utilizados en aplicaciones como localización de objetos, detección de objetos en entornos cerrados y en sistemas de seguridad.

Cada tipo de radar según su modulación tiene sus propias ventajas y desventajas, y es utilizado en diferentes aplicaciones según las necesidades específicas de cada una.

2.3.5 Según la forma de onda

Existen diferentes tipos de radares según la forma en que se genera y se emite la señal de radar. Dos de los tipos más comunes son:

1. Radar de onda continua (CW): Este tipo de radar emite una señal de radiofrecuencia continua. La señal se refleja en el objeto y se detecta en el radar. La frecuencia de la señal de radar se mantiene constante y se utiliza para medir la velocidad del objeto a partir del cambio Doppler en la frecuencia de la señal reflejada. Los radares de onda continua se utilizan comúnmente en aplicaciones de radar de velocidad, como el radar de tráfico y el radar meteorológico.

2. Radar de pulsos: Este tipo de radar emite pulsos cortos de señales de radiofrecuencia. Los pulsos de radar se transmiten en momentos específicos y se espera una señal de retorno para medir la distancia y la ubicación del objeto. La duración y la frecuencia de los pulsos de radar pueden variar según la aplicación, y se pueden utilizar para medir la velocidad y la dirección del objeto. Los radares de pulsos se utilizan en aplicaciones militares, de seguridad y de vigilancia, así como en radares de navegación y detección de objetos.

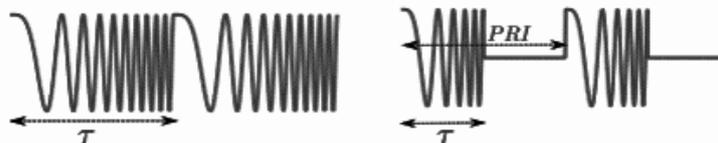


Figura 5. Comparación de ambas señales.

2.4 Radar de onda pulsada

2.4.1 Definición y funcionamiento

Un radar de onda de pulso es un tipo de radar que emite breves pulsos de ondas electromagnéticas y mide el tiempo que tardan en reflejarse en un objeto. La información recopilada se utiliza para determinar la distancia, la velocidad y la dirección del objeto.

El funcionamiento básico de un radar de onda de pulso es el siguiente: una antena emite un pulso de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, que viaja a través del espacio hasta encontrarse con un objeto. Parte de la energía del pulso es reflejada de vuelta hacia la antena, donde se recibe y se procesa la señal. La cantidad de tiempo que tarda la señal en viajar desde la antena hasta el objeto y de regreso se utiliza para calcular la distancia al objeto.

El radar de onda de pulso se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluyendo la navegación, la detección de objetos, el control de tráfico aéreo, la vigilancia militar y la medición del clima. Es especialmente útil para medir la distancia a objetos que están lejos o que se mueven rápidamente, ya que los pulsos de onda pueden ser enviados y recibidos en fracciones de segundo.

2.4.2 Parámetros fundamentales de un radar pulsado.

1. Ancho de pulso: es la duración del pulso de radio emitido por el radar. Este parámetro afecta la resolución de distancia, ya que cuanto más corto sea el ancho de pulso, mayor será la resolución de distancia.
2. Frecuencia de repetición de pulso (PRF): es la frecuencia a la que se emiten los pulsos de radio. Este parámetro afecta la resolución de velocidad, ya que cuanto mayor sea la frecuencia de repetición de pulso, mayor será la resolución de velocidad.



3. Longitud de onda: es la longitud de la onda electromagnética utilizada por el radar. Este parámetro afecta la resolución de distancia y la penetración en el material, ya que cuanto menor sea la longitud de onda, mayor será la resolución de distancia y mayor será la capacidad de penetración en el material.
4. Potencia de transmisión: es la cantidad de energía que el radar emite por pulso. Este parámetro afecta la resolución de distancia y la capacidad de detección, ya que cuanto mayor sea la potencia de transmisión, mayor será la resolución de distancia y mayor será la capacidad de detección.
5. Ganancia de la antena: es la medida de la directividad de la antena del radar. Este parámetro afecta la resolución de dirección, ya que cuanto mayor sea la ganancia de la antena, mayor será la resolución de dirección.
6. Sensibilidad del receptor: es la capacidad del receptor del radar para detectar señales débiles. Este parámetro afecta la capacidad de detección del radar, ya que cuanto mayor sea la sensibilidad del receptor, mayor será la capacidad de detección.

Estos parámetros fundamentales son esenciales para el diseño y la operación de un radar pulsado, y afectan la capacidad del radar para medir con precisión la distancia, la velocidad y la dirección de los objetivos.

2.4.3 Frecuencia de Repetición de Pulsos

Los radares pulsados están orientados a detecciones a largo alcance y por tanto emiten pulsos muy potentes. En esta categoría, los radares de pulso se pueden clasificar en función de la Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF), donde la PRF es la frecuencia con la que se emiten los pulsos de radar en un radar pulsado. Existen diferentes valores de PRF, en función de estos valores se encuentran diferentes aplicaciones y características, a continuación, se muestra una comparación de los tres tipos de valores que se consiguen y las características que los acompañan:

- PRF alto: un PRF alto significa que los pulsos de radar se emiten con una frecuencia alta, lo que permite una alta tasa de repetición de pulsos. Esto significa que el radar puede detectar objetos que se mueven rápidamente, como aviones de combate, misiles y otros objetos en movimiento rápido. Además, el PRF alto permite al radar detectar objetos a larga distancia con mayor precisión. Por otro lado, un PRF alto también puede generar una gran cantidad de energía y, por lo tanto, puede ser detectable por los sistemas de radar enemigos.
- PRF medio: un PRF medio se utiliza comúnmente en aplicaciones de radar de vigilancia aérea y terrestre, donde se necesita una detección de objetos de velocidad y alcance medios. El PRF medio es menos susceptible a la interferencia de otros radares cercanos y también puede ser menos detectable por sistemas de radar enemigos.



- PRF bajo: un PRF bajo se utiliza comúnmente en aplicaciones de radar de detección de objetos de velocidad baja y alcance cercano, como radares de tráfico y radares de control de tráfico aéreo. Un PRF bajo es menos susceptible a la interferencia y permite una mayor resolución en la medición de la distancia y la velocidad de los objetos. Sin embargo, un PRF bajo también tiene una tasa de actualización más baja y no puede detectar objetos en movimiento rápido o a larga distancia con tanta precisión como un PRF alto.

Si bien un PRF alto tiene muchas ventajas en términos de detección de objetos en movimiento rápido y a larga distancia, también tiene algunos inconvenientes. Algunos de los inconvenientes de un PRF alto son:

1. Mayor consumo de energía: para generar pulsos de radar a una frecuencia alta, se requiere una mayor cantidad de energía. Esto puede aumentar el costo operativo y el consumo del radar.
2. Mayor interferencia: los radares con un PRF alto pueden interferir con otros radares cercanos y también pueden ser detectables por los sistemas de radar enemigos. Esto puede limitar su uso en situaciones donde la ocultación es importante.
3. Menor resolución: un PRF alto puede tener una menor resolución en la medición de la distancia y la velocidad de los objetos. Esto se debe a que la distancia entre los pulsos de radar es menor, lo que hace que sea más difícil medir con precisión la distancia y la velocidad de los objetos en movimiento rápido.
4. Limitaciones en la detección de objetivos pequeños: debido a que los pulsos de radar son más cortos y están más juntos en un PRF alto, puede ser más difícil detectar objetos pequeños o débiles.

En general, un PRF alto es adecuado para aplicaciones donde se requiere una detección de objetos en movimiento rápido y a larga distancia. Sin embargo, es importante tener en cuenta los inconvenientes mencionados y evaluar cuidadosamente las necesidades de detección de objetos antes de elegir un PRF específico.

Es decir, el tipo de PRF que se elige para un radar pulsado depende de la aplicación específica y las necesidades de detección de objetos en cuanto a velocidad, alcance y precisión.

2.4.4 *Radars coherentes e incoherentes.*

Los radares pueden ser clasificados en dos categorías principales: radares coherentes e incoherentes, dependiendo del procesamiento de la señal que realizan.

- Un radar coherente utiliza un oscilador local para generar una señal de referencia coherente que se combina con la señal recibida para detectar la fase y la frecuencia de la señal reflejada por el blanco. Este procesamiento de señal coherente permite una mayor precisión en la medición de la velocidad y la distancia del objetivo. Además, un radar coherente puede ser capaz de detectar objetivos más pequeños y débiles que un radar incoherente.
- Un radar incoherente no utiliza un oscilador local y no mantiene la coherencia de la señal. En lugar de ello, utiliza un receptor no coherente que detecta la amplitud de la señal recibida. Los radares incoherentes suelen ser más simples y menos costosos que los radares coherentes, pero tienen una menor precisión en la medición de la velocidad y la distancia del objetivo.

Se podría decir que un radar coherente tiene una mayor precisión y puede detectar objetivos más pequeños y débiles, pero también es más complejo y costoso. Un radar incoherente es más simple y económico, pero tiene una menor precisión en la medición de la velocidad y la distancia del objetivo. La elección del tipo de radar a utilizar dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y el presupuesto disponible.

2.4.5 *Ciclo de trabajo.*

Hay que destacar el ciclo de trabajo como parámetro importante en un radar de onda de pulso, ya que afecta directamente a su rendimiento y características. El ciclo de trabajo se refiere a la proporción del tiempo que la antena de radar está emitiendo pulsos de onda electromagnética en comparación con el tiempo total del ciclo de operación, que incluye también el tiempo de recepción y el tiempo de inactividad.

La importancia del ciclo de trabajo en un radar pulsado se debe a varias razones:

1. Alcance máximo: El ciclo de trabajo afecta directamente al alcance máximo del radar. Un ciclo de trabajo más alto, es decir, una mayor proporción de tiempo de transmisión permite que el radar emita pulsos de mayor duración y, por lo tanto, pueda alcanzar objetivos más lejanos. Sin embargo, un ciclo de trabajo más alto también significa menos tiempo para la recepción de la señal reflejada, lo que puede afectar la precisión de la medición de la distancia.
2. Resolución en distancia: Un ciclo de trabajo más bajo, es decir, una menor proporción de tiempo de transmisión permite que el radar tenga una mejor resolución en distancia. Esto se debe a que los pulsos son más cortos, lo que permite detectar objetos cercanos con mayor precisión en términos de su posición exacta en la distancia.
3. Sensibilidad: El ciclo de trabajo también puede afectar la sensibilidad del radar. Un ciclo de trabajo más alto permite que el radar tenga una mayor sensibilidad, ya que más energía se emite durante el tiempo de transmisión. Sin embargo, un ciclo de trabajo más bajo



puede resultar en una menor sensibilidad, lo que puede dificultar la detección de objetivos débiles.

4. Capacidad de detección de objetivos en movimiento: El ciclo de trabajo también influye en la capacidad de un radar para detectar objetivos en movimiento. Un ciclo de trabajo más alto permite una mayor capacidad para detectar objetivos en movimiento rápido, ya que hay más tiempo disponible para medir cambios en la frecuencia de la señal reflejada debido al efecto Doppler. Sin embargo, un ciclo de trabajo más bajo puede limitar la capacidad del radar para detectar objetivos en movimiento rápido con precisión.

En resumen, el ciclo de trabajo es un parámetro importante en un radar de onda de pulso, ya que afecta al alcance máximo, la resolución en distancia, la sensibilidad y la capacidad de detección de objetivos en movimiento. Un ciclo de trabajo alto significa que el radar está transmitiendo durante la mayor parte del tiempo y recibiendo durante una fracción más pequeña del tiempo. Esto aumenta la tasa de transmisión de energía del radar, lo que puede mejorar la capacidad de detección del radar y aumentar el alcance máximo de detección. Sin embargo, un ciclo de trabajo alto también significa que el radar está recibiendo menos, lo que puede disminuir la sensibilidad del radar a objetivos más débiles y limitar la capacidad del radar para medir con precisión la distancia y velocidad de los objetivos. Por otro lado, un ciclo de trabajo bajo significa que el radar está transmitiendo durante una fracción más pequeña del tiempo y recibiendo durante la mayor parte del tiempo, por lo que es importante seleccionar y ajustar el ciclo de trabajo adecuado en función de los requisitos operativos y las características del radar para optimizar su rendimiento en una aplicación específica.

2.5 Radar de onda continua

2.5.1 Definición

En comparación con los radares de onda pulsada, los radares de onda continua transmiten de forma ininterrumpida tal y como se ha comentado anteriormente. Puede ser visto como un radar de onda pulsada con un ciclo de trabajo del 100%. Dentro del radar de onda continua destacamos el radar de onda continua con modulación en frecuencia, FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Este tipo de radar es una buena opción para vehículos autónomos debido a que puede medir el alcance y la velocidad radial para múltiples objetivos a la vez, lo hace utilizando una señal de radio de frecuencia modulada para detectar objetos y medir su distancia y velocidad. A diferencia de otros tipos de radar que utilizan pulsos de radio, este radar FMCW emite energía electromagnética de forma continua y utiliza antenas separadas de transmisión y recepción.

2.5.2 Parámetros fundamentales y funcionamiento de un radar FMCW

Como se ha visto anteriormente estos tipos de radares tienen la ventaja de poder procesar, obtener la posición, velocidad y ángulo. Por otro lado, cabe destacar su capacidad de tener una baja influencia por condiciones ambientales, como la temperatura o la iluminación. Por esta razón este tipo de radar puede ofrecer muchas ventajas, de esta forma obtener los parámetros que caracterizarán el blanco se convierte en tarea fundamental, para ello se utilizan ecuaciones en base a la idea general del funcionamiento de un radar FMCW. El radar transmite una señal continua

con una frecuencia variable en forma lineal con cierto ancho de banda, esta señal se verá reflejada en el objetivo/blanco y llegará a la antena receptora con un tiempo de retardo proporcional a la distancia del cuerpo. Estas señales son mezcladas dando lugar a una señal de frecuencia intermedia (IF), esta frecuencia obtenida es proporcional a la distancia del objetivo/blanco, es decir, se generan diferentes frecuencias intermedias en función de la distancia a la que se encuentra el objetivo/blanco.

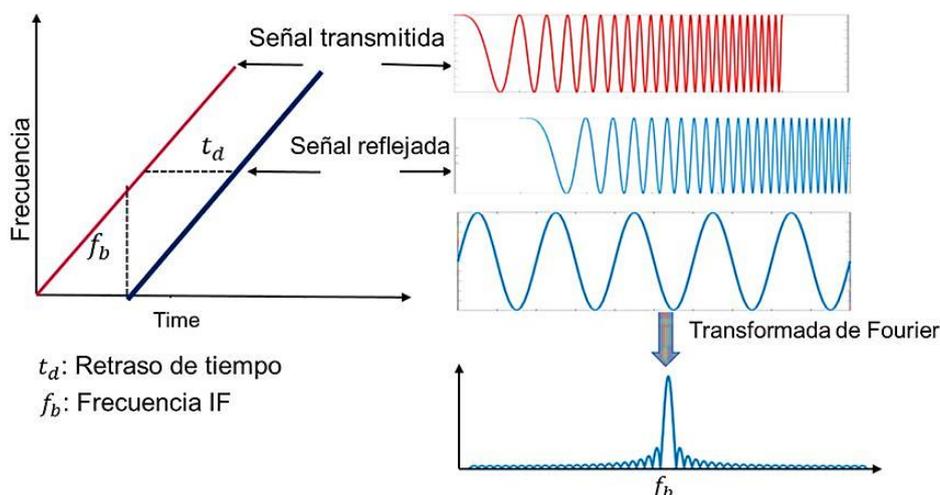


Figura 6. Funcionamiento básico de un radar FMCW.

El valor de la distancia a un objetivo/blanco se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{c \cdot T_c \cdot f_b}{2 \cdot B} \quad (2)$$

Dónde:

R, hace referencia a la distancia al objetivo/blanco.

c, hace referencia a la velocidad de la luz.

T_c , hace referencia al tiempo de chirp.

f_b , hace referencia a la frecuencia de la señal IF.

B, hace referencia al ancho de banda.

La resolución de distancia es la capacidad para distinguir entre objetivos que están muy cercanos en un rango determinado.

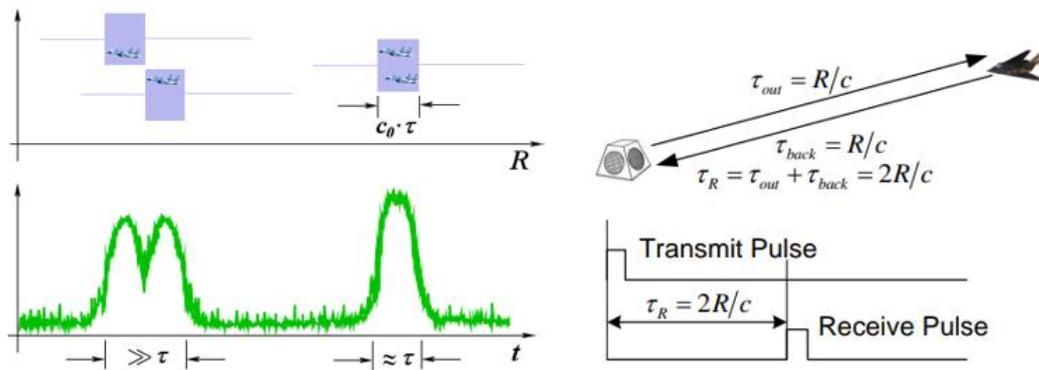


Figura 7. Resolución en rango.

Esta capacidad para distinguir dos objetos cercanos se determina mediante la ecuación:

$$\Delta R = R = \frac{c}{2 \cdot B} = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (3)$$

Dónde:

ΔR y R es la resolución en rango.

c , hace referencia a la velocidad de la luz.

B , hace referencia al ancho de banda $B=1/\tau$

La distancia máxima puede determinarse en función de la frecuencia de muestreo según la siguiente ecuación:

$$R_{max} = \frac{f_s \cdot c}{2 \cdot S} \quad (4)$$

Dónde:

R_{max} , es el alcance o distancia máximos.

f_s , es la frecuencia de muestreo.

C , es la velocidad de la luz.

S , es la pendiente de la modulación $S= B/Tc$

Por otra parte, la velocidad máxima estará dada por la siguiente ecuación:

$$V_{max} = \frac{c}{4 \cdot f_c \cdot T_c} \quad (5)$$

Dónde:

V_{max} , es la velocidad máxima.

C , es la velocidad de la luz.

f_c , es la frecuencia de chirp.

T_c , es el tiempo del chirp.

En caso de tener diferentes objetos se tendrán diferentes frecuencias, por lo que en lugar de aplicar la ecuación 2, se emplea un análisis espectral a partir de la transformada de Fourier (FFT).

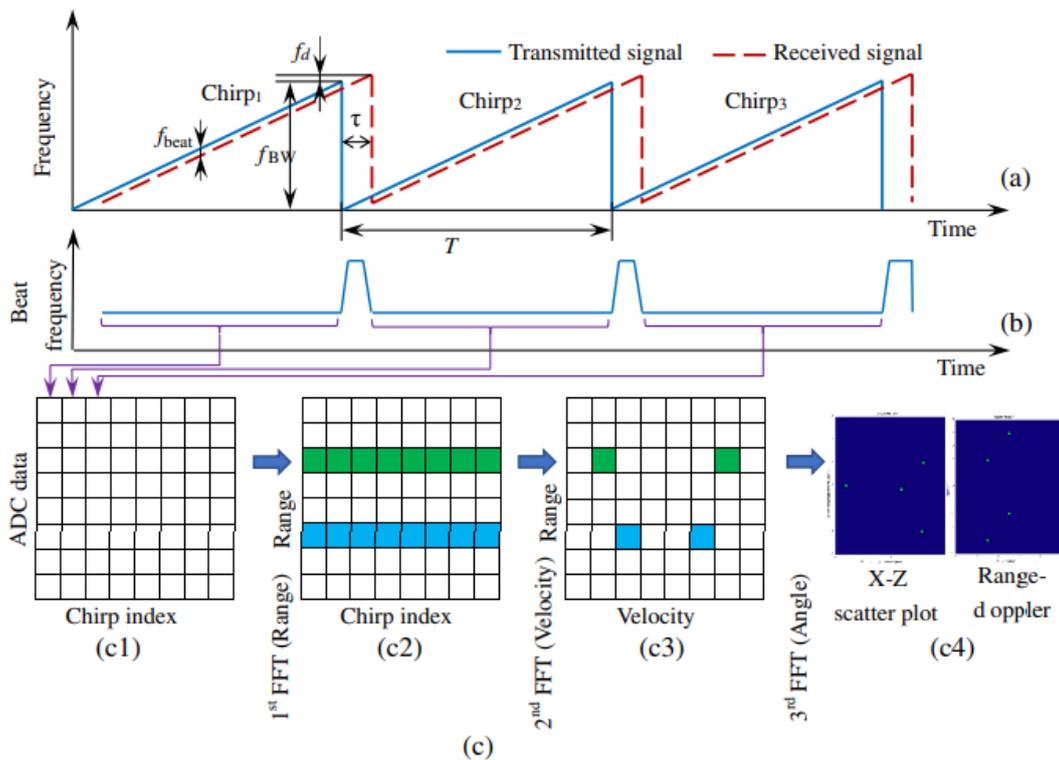


Figura 8. Funcionamiento completo de un radar FMCW.

La señal transmitida está modulada en frecuencia por una onda de sierra periódica. La señal recibida es una copia que incluye el desplazamiento de frecuencia (desplazamiento Doppler, f_d) y el retardo temporal τ , como se muestra en la Fig. 8(a). La f_{BW} es el ancho de banda de modulación, y T es el periodo de modulación o tiempo de barrido. El desplazamiento Doppler es causado por el movimiento relativo entre el objeto y el radar. La señal que viaja entre el objeto y el radar provoca el retardo. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la recibida se denomina "frecuencia de batido", que contiene la información sobre el alcance y la velocidad, como se muestra en la Fig. 8(b). Para el caso de la modulación de onda de sierra, el alcance y la velocidad de los objetos son difíciles de medir debido al efecto de acoplamiento alcance-Doppler. Obtenemos el alcance, velocidad, y el ángulo de información de los diferentes objetos a través de tres FFT, como se muestra en la Fig. 8(c).

Adquirimos un número de datos de las chirps, organizamos en forma de matriz, donde cada columna de la matriz representa la señal de batido de un objeto. matriz representa la señal de batido de un solo chirp [Fig. 8(c1)]. Esta señal de batido de un solo chirp compuesta por múltiples objetivos debe procesarse mediante una transformada rápida de Fourier (FFT) para separar los diferentes objetos del rango. La transformada de Fourier dará como resultado un espectro de frecuencias que tiene picos separados y cada pico denota la presencia de un objeto a una distancia determinada. Este procesamiento se denomina rango-FFT y el resultado se muestra en la Fig. 8(c2). El rango-FFT correspondiente a cada chirp tendrá picos en el mismo lugar, pero con una fase diferente. La diferencia de fase corresponde a la velocidad de desplazamiento.

Sin embargo, el método de medición de la velocidad basado en los dos chirridos cercanos no funciona cuando se mueven múltiples objetos con velocidades diferentes y a la misma distancia al radar en el momento de la medición. Se realiza una FFT sobre la secuencia de fasores correspondiente al alcance-FFT resuelve muy bien este problema. Este procesamiento se denomina Doppler-FFT y el resultado se muestra en la Fig. 8(c3). La range-FFT y la Doppler-FFT no funcionan cuando dos objetos equidistantes y con la misma velocidad relativa al radar. Entonces es necesario estimar el ángulo de llegada. La estimación del ángulo se basa en el cambio de fase en el pico de la range-FFT o Doppler-FFT debido a la distancia diferencial del objeto a cada una de las antenas, lo que requiere al menos 2 antenas RX. Del mismo modo, una FFT sobre la secuencia de fasores correspondientes a la 2D-FFT (range-FFT y Doppler-FFT) resuelve el problema de estimación angular. Esto se llama ángulo-FFT y el resultado se muestra en la Fig. 8(c4). Después de tres FFT, se obtiene la información de alcance, velocidad y ángulo de los objetos.

2.6. Clasificación de los objetivos a detectar

Los objetivos se pueden clasificar según su sección radar (RCS, del inglés *radar cross section*), magnitud (expresada en unidades de área) que caracteriza la cantidad de energía reflejada hacia el radar de un blanco, es decir, indica cuán detectable es un objeto. En el caso de que tengamos un RCS elevado, esto significa que será más probable detectar el objeto. Por el contrario, si la RCS es pequeña, la probabilidad de detectar el blanco será menor. En la literatura se pueden encontrar valores típicos de la sección transversal del radar para objetivos comunes, que han sido determinadas mediante medición experimental o calculadas mediante modelos numéricos, para lo que se necesita información detallada del blanco y se debe realizar una gran cantidad de simulaciones en función de la frecuencia de funcionamiento del radar y el ángulo de observación del radar. A continuación, se muestra una tabla con los diferentes tipos de RCS comunes:

Tipos de blancos	RCS (m ²)	RCS (dBm)
Insecto o pájaro	10 ⁻⁵ a 10 ⁻²	-50 a -20
Persona	0.5 a 2	-3 a 3
Avión pequeño	1 a 10	0 a 10
Avión grande	10 a 100	10 a 20
Coche o camión	100 a 300	20 a 25
Barco	200 a 1000	23 a 30

Tabla 5. Tipos de blancos [1].

Más adelante se procederá a simular el radar con la RCS referida de una persona (que es un valor usado habitualmente como referencia) y de un avión pequeño con el fin de modelar nuestro radar DAA. Cabe destacar que, si bien los valores indicados en la tabla son meramente orientativos, los tomaremos como base para el desarrollo del trabajo, ya que la caracterización precisa de blancos reales es una tarea compleja y fuera del alcance de este trabajo.

Capítulo 3. Diseño previo (FMCW a 24GHz)

Como hemos definido antes, el funcionamiento básico de un radar FMCW se basa en la emisión de una señal de radio de frecuencia modulada que se transmite a través de una antena hacia el objeto que se desea detectar. Esta señal se refleja en el objeto y regresa a la antena del radar, donde se detecta y se analiza. Esta frecuencia de la señal de radio emitida se modula en forma lineal en el tiempo, aumentando o disminuyendo su frecuencia en un rango específico conocido como "ancho de banda". La diferencia entre la frecuencia de la señal transmitida y la frecuencia de la señal recibida se conoce como "diferencia de frecuencia de desplazamiento Doppler" y se utiliza para determinar la velocidad del objeto detectado. Por otro lado, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo que tarda la señal de radio en viajar desde el radar hasta el objeto y regresar. Esta medida se realiza midiendo la diferencia de fase entre la señal de radio transmitida y la señal de radio recibida, que está relacionada con el tiempo de viaje de la señal.

Tras realizar los cálculos oportunos para el correcto diseño de un radar FMCW que trabaje a una frecuencia de 24 GHz con una resolución en rango de 50 m, un $RCS = 1m^2$ y un alcance de 1500 m y una antena con una ganancia de aproximadamente 13 dB, se pudo observar que la mayor dificultad que se obtuvo fue la de encontrar componentes que trabajan a esa frecuencia ya que se requería una potencia de transmisión muy elevada para el tipo de radar a tratar. Aplicando la ecuación radar que aparece en el TFG de mi compañero Àngel Sánchez Navarro, donde teniendo en cuenta los siguientes requisitos en los que se basa el diseño se llega a la conclusión de que para dichas características se necesita una potencia de transmisión de 1.89 kW, es decir unos 62.77dBm.

$$R^4_{max} = \frac{cPt \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot I_n}{(4\pi)^3 \cdot K \cdot T_o \cdot Br \cdot Fr \cdot SNR_{min} \cdot L} \quad (6)$$

Fr	4,5
Rmax(m)	3,00E+03
G(dBi)	13
λ (m)	1,25E-02
σ (m ²)	1
k	1.38E-23
To(K)	290
Br (Hz)	3,00E+06
L(dB)	0
S/N(dB)	14
Ts(K)	290
In	57,6

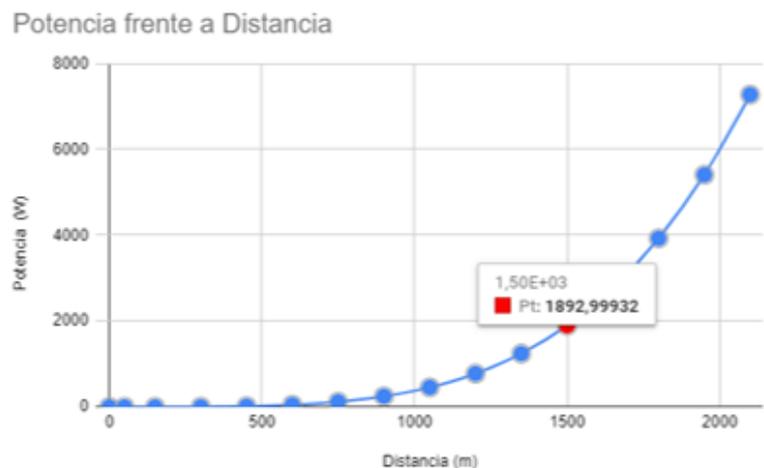


Figura 9. Resultados diseño a 24 GHz.



Se observa que a mayor distancia mayor potencia se requiere, en nuestro caso se necesita una elevada potencia, pero concuerda debido a que la antena que se proporciona como requisito dispone de una ganancia de 13dB, el principal inconveniente por el que no se continua con este diseño a 24 GHz es la falta de componentes a 24 GHz para el diseño, en particular para el VCO, además de que con la potencia de 3.16mW que se plantea el diseño a 24 GHz se obtiene un radar de corto alcance y no de largo alcance como se pretendía.

Recapitulando se analiza que la potencia de transmisión calculada para una distancia de 1500m y un blanco de 1m², se requiere una potencia de transmisión de 1893 W y no de 3.16mW como se definía. Con una potencia de transmisión de 3.16mW y con las características de la tabla se obtiene un alcance de aproximadamente 54m.

Aparte de realizar estos cálculos, más adelante se ha simulado con AWR el alcance que se obtendría para una potencia de transmisión de 13 dBm, pero para el caso de 2,4 GHz, ya que como hemos mencionado, encontrar componente a 24 GHz dificultaba el proceso de diseño.

Como pequeña síntesis se podría decir que los radares FMCW a 24 GHz son sistemas de radar que se caracterizan por tener un alcance útil que varía según las condiciones ambientales, el tamaño y la forma del objeto a detectar y el tipo de antena utilizada. En general, estos radares tienen un alcance efectivo de varios cientos de metros en condiciones favorables, como en áreas abiertas y sin obstrucciones. Sin embargo, en áreas urbanas o en presencia de obstáculos, el alcance efectivo puede verse reducido significativamente.

Es importante tener en cuenta que el alcance del radar no es la única medida a tener en cuenta a la hora de su diseño. Otros factores importantes a considerar incluyen como la resolución espacial y temporal, la precisión de la medida de la velocidad, la interferencia y el ruido.

En resumen, los radares FMCW a 24 GHz son sistemas de radar capaces de detectar objetos a varios cientos de metros en condiciones favorables, pero su alcance efectivo puede verse afectado por diversos factores ambientales y técnicos. Funciona emitiendo una señal de radio de frecuencia modulada y midiendo la diferencia de frecuencia de desplazamiento Doppler y la diferencia de fase de la señal de radio reflejada para determinar la velocidad y la distancia del objeto detectado.

Capítulo 4. Alternativas y posibles soluciones

Tal y como se ha podido observar anteriormente, la dificultad de realizar el diseño a 24GHz supuso un cambio en el diseño, por lo que se plantea la siguiente alternativa:

En base a un modelo de radar SMR (Radar de movimiento de Superficie) realizado por Indra el cual trabaja a una frecuencia de banda X, se fundamenta nuestro diseño. Este radar de movimiento de superficie es un radar que se utiliza para la aplicación del ámbito del control del tráfico aéreo capaz de detectar obstáculos estables o en movimiento, además de caracterizarse por su buen funcionamiento en condiciones de mala visibilidad como la niebla, la lluvia o la oscuridad. Este radar utiliza el método de radar de onda continua con modulación en frecuencia lineal, esto permite al radar utilizar potencias de transmisión bajas para alcance medianamente largos, en este caso este radar dispone de una gran antena que facilita la localización de objetos a grandes distancias, en concreto dispone de un alcance de aproximadamente 6km. A continuación, se mostrará las características de este tipo de radar en el que se fundamenta nuestra potencia de transmisión:

Min/max oblique range coverage	100 / 6000 m
Range coverage with 16 mm/h rainfall	> 4600 m
Azimuth accuracy	< 0.044°
Range resolution, 1 m ² target	< 6 m
Azimuth resolution at 2 Km	< 15 m
Target processing capability (60 rpm)	> 300
Maximum processing delay	< 0.25 s
Frequency band	X Band (9.0 to 9.5 GHz)
Waveform	Linear Frequency Modulation Continuous Wave (LFM-CW)
Frequency diversity	4 frequencies
Transmitter output power	5 watts, continuous wave
LFM sweep	> 200 MHz
Receiver noise figure	< 4.5 dB
Video bandwidth	7.5 MHz
A/D converter	12 bits
FFT length	2048 points complex
Clutter suppression and CFAR	Based on clutter map
Antenna:	
Gain	>35 dBi minimum
Beam width, azimuth	< 0.4°
Elevation beam form	Inverse cosecant squared
Polarization	Circular
Antenna revolutions	60 rpm
System availability	99,99%

Figura 10. Ficha técnica radar SMR [17].

Tal y como se puede observar en la figura, con una potencia de 5W se consigue un alcance de 6km para una ganancia de antena de 36 dB, con estos datos se plantea que para una potencia de 5W equivalente a 37dBm aproximadamente con una antena de 36dB se consigue el alcance anteriormente nombrado, por lo que para una distancia objetivo de 1,5 km la cual es la cuarta parte de 6km se necesitará previamente un valor de aproximadamente de unos 28dBm para conseguir el alcance deseado de 1,5km para nuestra antena de 13dB de ganancia.

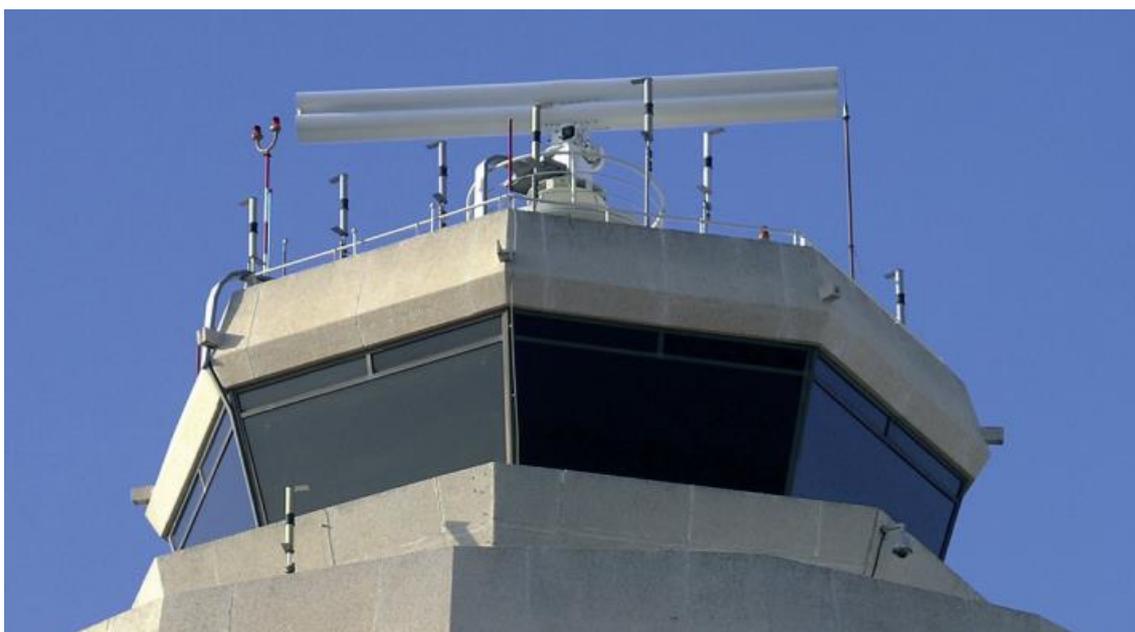


Figura 11. Radar SMR.

Se puede apreciar la gran magnitud que supone la antena que compone este radar SMR, ahí radica el principal problema para conseguir nuestro alcance de 1,5km, ya que las dimensiones de esta antena no son nada viables para la implementación en nuestros vehículos aéreos, supondría un gran inconveniente ya que las dimensiones serían más grandes que el propio aerotaxi o el propio dron, por ello no se puede implementar una antena de tanta ganancia, ya que supondría un aumento en sus dimensiones, similares a las de este ejemplo, por ello no debemos salirnos de nuestro principal objetivo, que es la implantación de un radar para un aerotaxi o dron con dimensiones relativamente pequeñas, por esta razón la antena que se ha diseñado tiene una dimensiones pequeñas razonables para su correcta implementación en un dron.

Como resumen se plantea una relación de potencias basando el nuevo modelo en una potencia de transmisión de 27 dBm, con el que teóricamente se pretende lograr un alcance de 1500m, más adelante se verá como esta potencia no es suficiente para satisfacer el alcance deseado, ya que la problemática que se planteaba era la potencia de transmisión, con esta nueva potencia de transmisión se pretende conseguir el tan deseoso objetivo.

Hay que tener en cuenta que el modelo de radar en el que se fundamenta esta potencia de transmisión es para cubrir largas distancias, pero con el detalle de que utilizan una antena de mucha más ganancia que la que se nos plantea en nuestro diseño. En este punto se plantean los siguientes conceptos:

- Aumentar la potencia de transmisión hasta el punto de obtener los objetivos definidos. Los cálculos daban como resultado una potencia alrededor de 63dBm para un alcance óptimo de 1500m para la detección de una persona de 1m².

A continuación, se va a proceder a la búsqueda de componentes y la ejecución del diseño planteado.

Capítulo 5. Estudio de mercado

Para poder realizar el correcto estudio de mercado hay que definir los componentes que se van a utilizar, en nuestro caso nos centraremos en primer lugar en la etapa de transmisión, que por lo general se compone de los siguientes componentes si se trata de un sistema superheterodino:

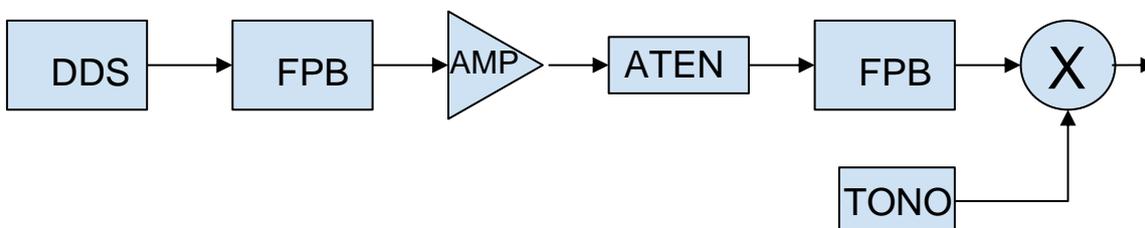


Diagrama 1. Transmisor superheterodino.

Del siguiente esquemático la parte más imperante en la que nos vamos a centrar es el DDS o como alternativo el VCO. Para ello se va a explicar el componente más característico de la etapa de transmisión. Como componente principal tenemos el DDS, un sintetizador digital directo (DDS) es un dispositivo electrónico que se utiliza para generar señales eléctricas de alta precisión y frecuencia. Está compuesto por un oscilador de cristal y un circuito digital que permite ajustar la frecuencia y la fase de la señal de salida. La función principal de un DDS es generar señales de alta precisión y estabilidad en aplicaciones como la generación de señales de radiofrecuencia, la síntesis de formas de onda, la modulación de frecuencia, la medición de tiempo y frecuencia, y otras aplicaciones que requieren una señal de alta calidad.

En comparación con otros métodos de generación de señales, como los osciladores controlados por voltaje (VCO), los DDS ofrecen una mejor precisión y estabilidad a lo largo del tiempo y una mayor flexibilidad para ajustar la frecuencia y la fase de la señal. Además, los DDS pueden programarse para generar una amplia gama de frecuencias y formas de onda complejas, lo que los convierte en una herramienta muy versátil en el campo de la electrónica.

En nuestro caso nos hemos decantado por un VCO por la facilidad del diseño y sus aptitudes para el conjunto para trabajar en banda X.

La etapa de recepción de un superheterodino está compuesta por los siguientes elementos:

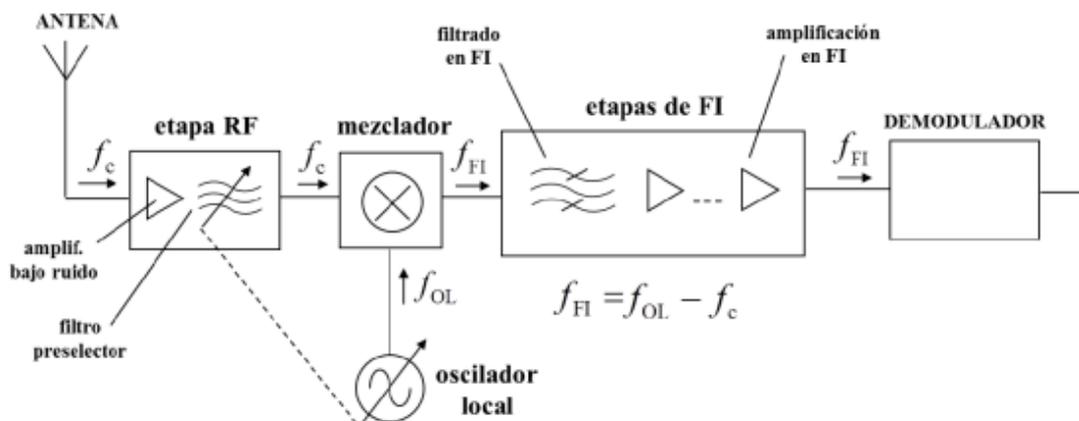


Diagrama 2. Receptor Superheterodino.

En esta etapa se procede a definir el funcionamiento de cada componente:

- El amplificador de RF debe amplificar la señal a su entrada, se realiza este proceso debido a que la señal que se recibe es débil, este amplificador realiza la amplificación introduciendo bajo ruido.
- La función del filtro RF es dejar pasar la banda de los canales deseados y eliminar la banda imagen.
- El mezclador es el encargado de realizar la conversión en frecuencia, eligiendo la f_{OL} para que a la salida del mezclador el canal de RF deseado se encuentre a la frecuencia intermedia f_{FI} del receptor.
- El filtro de la etapa de frecuencia intermedia FI, se encarga de seleccionar el canal ubicado a f_{FI} a la salida del mezclador y procede a eliminar el resto, donde $f_{FI}=f_o$.
- El amplificador FI, amplifica el canal seleccionado logrando a la entrada del demodulador un nivel de potencia media adecuado.

En nuestro caso vamos a tratar con un sistema homodino para simplificar el sistema. Un radar homodino es un tipo de radar que utiliza un receptor homodino, también conocido como receptor heterodino simplificado. Este tipo de radar se utiliza para medir la distancia y la velocidad de un objeto mediante el uso de ondas de radio, con esta simplificación nuestro esquemático queda de la siguiente forma:

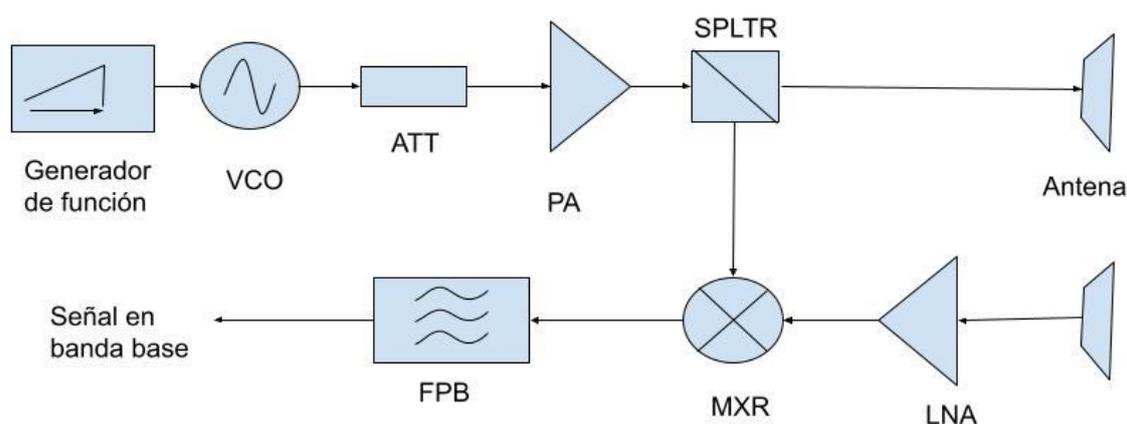


Diagrama 3. Sistema radar homodino.

El esquemático que se observa en la figura, es el que se ha definido para implementar el diseño que se ha planteado en este trabajo de fin de grado, en base a este modelo se ha implementado en AWR para realizar las correctas simulaciones, verificar el diseño y su correcto funcionamiento.



A continuación, se muestran los componentes que se han encontrado para implementar en el diseño a la frecuencia de 2.4 GHz y a 9.5GHz.

En primer lugar, hallamos los componentes a 2.4GHz:

Componentes 2,4 GHz	Potencia de salida, atenuación o ganancia	€	Enlaces
Oscilador (VCO) ZX95-2536C	6dBm	374.22€	https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX95-2536C-S+.pdf https://es.aliexpress.com/i/32693965824.html
Atenuador VAT-3	-3.2 dB	18.85€	https://www.mouser.es/ProductDetail/Mini-Circuits/VAT-30A%2b?qs=Jm2GQvTW%2Fbiw%2F2dTxD9WRA%3D%3D
Amplificador de potencia (PA) ZX60-272LN-S	14 dB	116.17€	https://www.mouser.es/ProductDetail/Mini-Circuits/ZX60-272LN-S%2b?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqaYp9OhssAAw%3D%3D
Divisor ZX10-2-42	-3.2 dB	44,21€	https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZX10-2-42-S%2B
Amplificador (LNA) ZX60-272LN	14 dB	116.17€	https://www.mouser.es/ProductDetail/Mini-Circuits/ZX60-272LN-S%2b?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqaYp9OhssAAw%3D%3D
Mezclador	-6dB	58,76€	https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZX05-43MH-S%2B

Tabla 6. Componentes a 2.4 GHz.



En segundo lugar, se haya los componentes a 9,5 GHz:

Componentes 9,5 GHz	Potencia de salida, atenuación o ganancia	€	Enlaces
Oscilador (VCO) 584-HMC510LP5E	13dBm	44.18€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/609/hmc510-3122898.pdf
Atenuador (ATT) 754-PAT0510SC3DBT10	-3dB	0.10€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/392/Susumu_01192017_PAT-1206544.pdf
Amplificador de potencia (PA) HMC608LC4	29.5dB	133.91 €	https://www.mouser.es/data-sheet/2/609/hmc608-1503970.pdf
LNA HMC8411TCPZ-EPPT	14dB	88.91€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/609/hmc8411lp2fe-3122942.pdf
Atenuador PAT1220C-2DBT5	-2dB	0.31€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/392/Susumu_01192017_PAT-1206544.pdf
Mezclador HMC412BMS8GE	-8dB	18.34€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/609/HMC412b-3122623.pdf
Divisor 139-EP2W1	-3.4dB	33.97€	https://www.mouser.es/data-sheet/2/1030/EP2W1_2b-1700432.pdf

Tabla 7. Componentes a 9.5 GHz.

Capítulo 6. Implementación por software

6.1 Software

El software con el que se va a realizar el diseño y con el que se va a simular el sistema, es AWR, un software de National Instruments que ofrece una gran variedad de productos destinados al diseño electrónico de alta frecuencia, con una fácil interfaz con la que poder trabajar, aportando diversas ventajas como su gran número de librerías con componentes y diferentes funciones.

6.1.1 *Microwave Office*

Este software nos permite realizar diversas funciones como las siguientes:

1. Diseño esquemático/layout.
2. Simulación de circuitos lineales y no lineales.
3. Análisis electromagnético.
4. Síntesis, optimización y análisis de rendimiento.
5. Verificación de reglas de diseño/layout frente a esquemáticos.

Diferentes funciones que permiten ejecutar diseños de una manera mucho más sencilla.

6.1.2 *Software AWR Virtual System Simulator (VSS)*

Este software, VSS se trata de una herramienta de automatización de diseño electrónico que ofrece una solución interactiva para modelar, analizar y optimizar sistemas de comunicaciones analógicas y digitales. Este software permite análisis de radiofrecuencia (RF) y procesamiento de señales (DSP) para ofrecer una solución integral de diseño de sistemas de comunicaciones. Es decir, se trata de un potente software de diseño de sistemas de radar y comunicaciones RF/inalámbricas. Con este software AWR VSS, los equipos de diseño inalámbricos aplican modelos de RF sensibles a la impedancia y bloques de procesamiento de señales de banda base para desarrollar y optimizar arquitecturas de diseños, con el objetivo de determinar las especificaciones de los componentes para lograr los mejores resultados para un buen rendimiento general.

6.1.3 *Ventajas de AWR VSS*

- a. Rapidez. Permite el modelado de comportamiento consciente de la impedancia para un diseño arquitectónico rápido, con especificación de componentes.
- b. Precisión. Permite co-simular electromagnéticamente, con el objetivo de incorporar un diseño preciso a nivel de componentes para el desarrollo de sistemas de comunicaciones de RF a banda base.
- c. Validación. Consta de una variedad de bancos de pruebas virtuales que proporcionan las herramientas idóneas para verificar los sistemas diseñados.

6.2 Diseño radar FMCW a 2.4 GHz

Para realizar el esquemático del radar a 9.5GHz nos hemos basado en un radar realizado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) que trabaja a una frecuencia de 2.4GHz, este radar se construyó con el objetivo de poder medir distancia y velocidad de una forma sencilla.

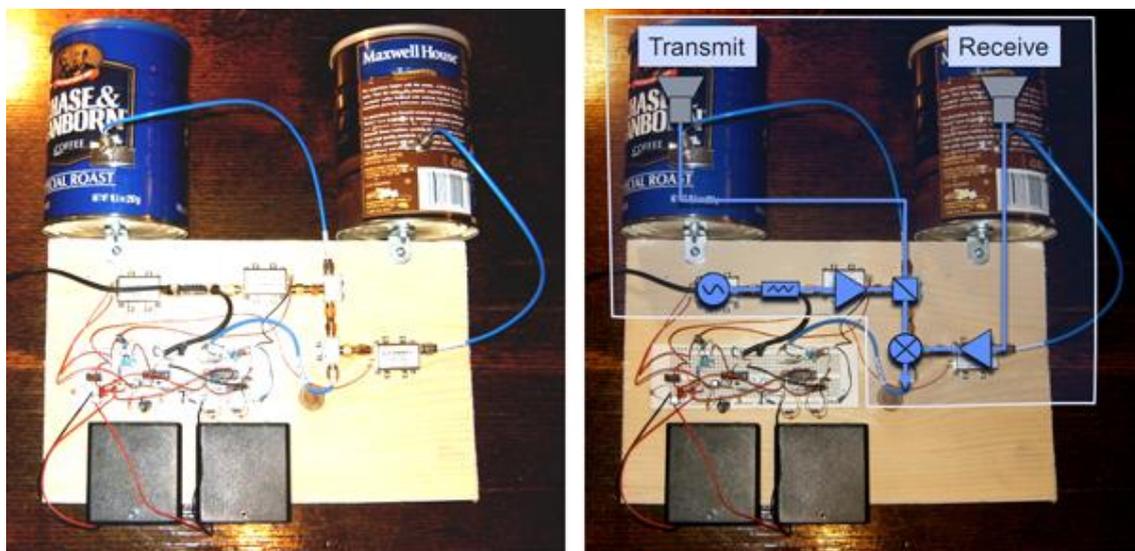


Figura 12. Sistema "Coffee Can Radar".

Tal y como se observa en la imagen, los componentes que se utilizaron para realizar el proyecto son los siguientes:

Componente	Potencia de salida, atenuación o ganancia
Oscilador (VCO)	6 dBm
Atenuador (ATT)	-3.2 dB
Amplificador de potencia (PA)	14 dB
Divisor (SPLTR)	-3.2 dB
Amplificador de bajo ruido (LNA)	14 dB
Mezclador (MXR)	-6 dB

Tabla 8. Características componentes a 2.4 GHz.

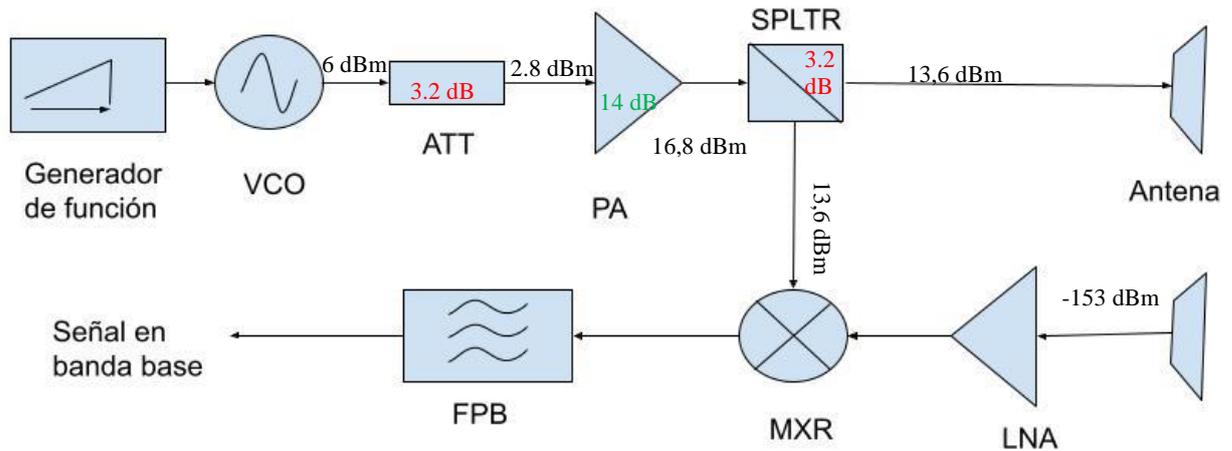


Diagrama 4. Balance de potencias.

Los componentes se eligieron con el objetivo de obtener una potencia de transmisión aproximada de 13 dBm. Realizando el correcto balance de potencias obtenemos el correspondiente circuito, con estos valores se procede a obtener la potencia que se recibe en la etapa de recepción, para ello se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$Prx = \frac{Ptx \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R} \cdot \sigma \quad (1)$$

Con una ganancia de antena de 7.1 dB, una potencia de transmisión de 13.6 dBm, con un RCS=0.01m² y con una frecuencia de 2.4 GHz para una distancia de 560m se obtiene una potencia de recepción de -153 dBm aproximadamente.

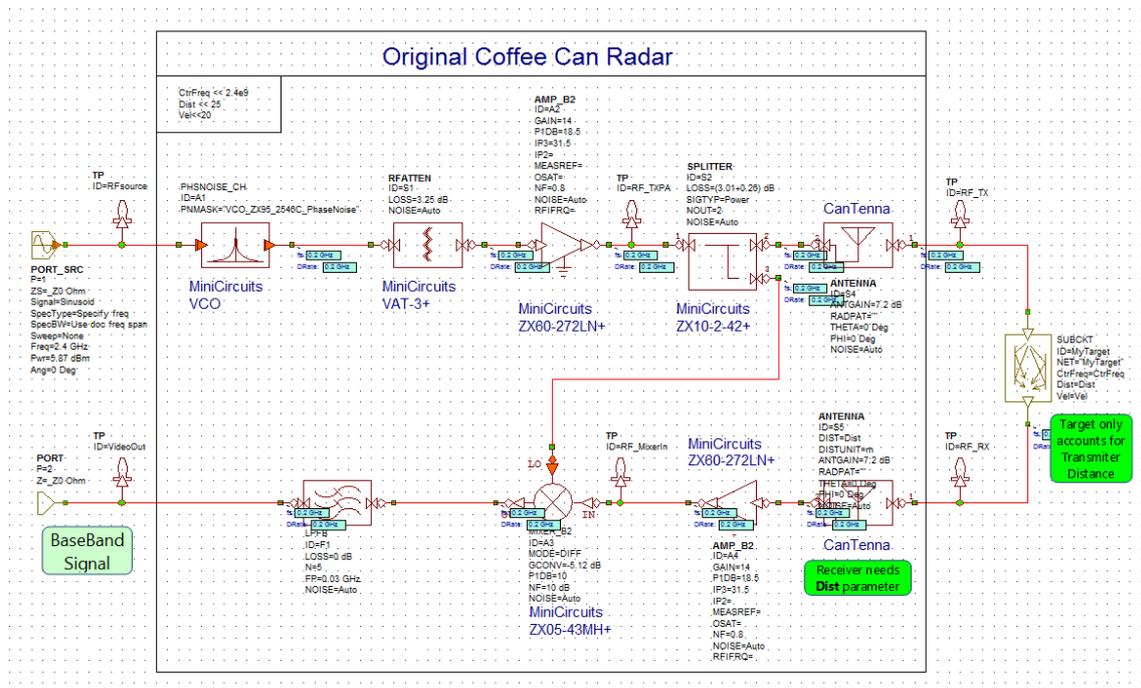
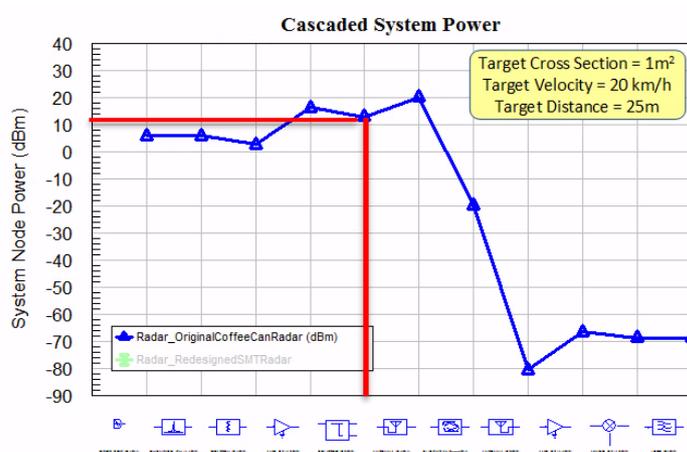


Diagrama 5. Sistema "Coffe Can Radar" en VSS

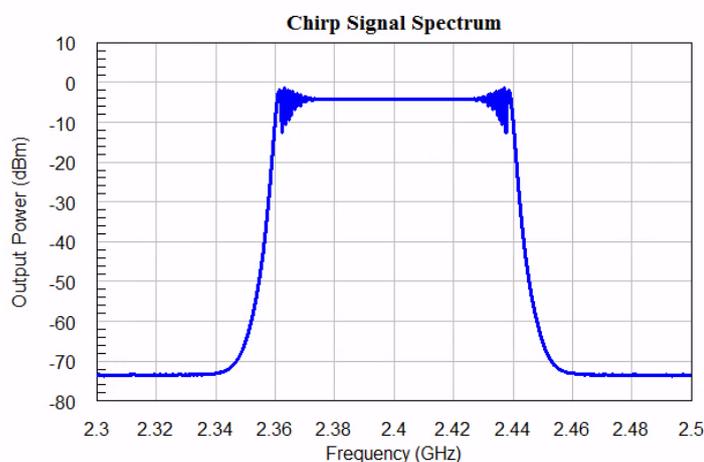
Tal y como se puede observar en la imagen, el esquemático está compuesto por bloques de simulación de AWR VSS, se trata de modelos matemáticos que representan el rendimiento de los componentes reales extraídos de la información de los catálogos suministrados por los fabricantes. Cabe destacar que para el diseño se ha utilizado la biblioteca de radar de antena incorporada de AWR VSS para poder utilizar fácilmente funciones como el modelo de objetivo y el procesamiento de banda base.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se procede a simular una serie de características. En primer lugar, se realiza una comprobación del balance de potencias al que se quería llegar. El objetivo era obtener una potencia de transmisión de aproximadamente 13 dBm, es decir, a la salida del divisor antes de la antena debemos tener una potencia de transmisión de 13dBm. Se realiza la simulación para un blanco a una distancia de 25m y a una velocidad de 20km/h, con una sección recta-radar equivalente a 1, que tal y como se puede observar en la gráfica se completa con éxito.



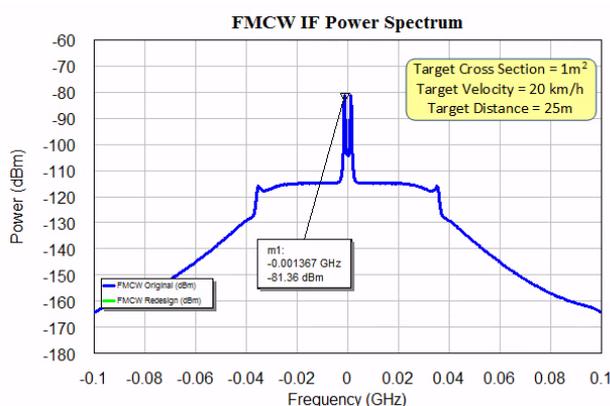
Gráfica 1. Potencia del sistema.

Para comprobar si el sistema trabaja a la frecuencia deseada de 2.4GHz, se ejecuta la siguiente grafica donde se puede observar el espectro centrado a 2.4 GHz a la salida de la etapa de transmisión.



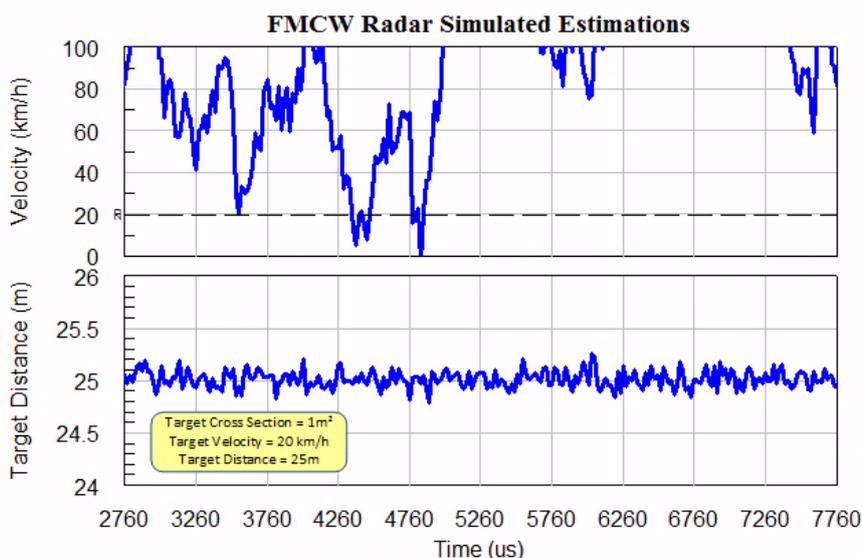
Gráfica 2. Espectro de la señal a 2.4GHz.

Una característica útil del software AWR VSS es que, una vez construidos los diagramas de bloques del sistema de RF, se pueden ejecutar simulaciones en el dominio del tiempo y propagar la señal FMCW a través del sistema diseñado. La siguiente figura muestra los espectros de las señales de FI a la salida del sistema, ilustrando los picos de frecuencia positivos y negativos debidos a la distancia y al desplazamiento Doppler de la señal de radar FMCW. Una vez sacada la FI de la simulación, se procede a realizar el procesamiento de la señal en el dominio de la frecuencia. Las ubicaciones de los dos picos se utilizaron para evaluar la distancia del blanco (alcance) y el desplazamiento Doppler (velocidad). La distancia entre los dos picos y su desplazamiento respecto a cero determinan la velocidad y la distancia.



Gráfica 3. Espectro de la señal a Frecuencia Intermedia.

Los bloques de procesamiento de señales AWR VSS pueden utilizarse para extraer estas estimaciones. De este modo, además de obtener el espectro, se puede empezar a trazar gráficos de las estimaciones de distancia y velocidad del blanco, como se muestra en la siguiente figura:



Gráfica 4. Resultados de distancia y velocidad a 2.4 GHz.

Dónde se observa como la distancia tiene un buen comportamiento, pero la velocidad tiene mayor margen de error, ya que la velocidad del blanco debida al desplazamiento Doppler es la medida más compleja de discriminar.

6.3 Diseño radar FMCW a 9.5 GHz

Para realizar este diseño hay que tener en cuenta el diseño previo, dónde se define los objetivos del sistema, de acuerdo con lo dicho se recapitula las características que tenía que cumplir nuestro sistema. Para ello se va a representar en una tabla el alcance deseado y los tipos de blancos que se pretende detectar.

Blanco/objetivo	RCS	Alcance máximo
Aerotaxi	10m ²	1500m
Persona	1m ²	500m
Dron pequeño	0.5m ²	300m

Tabla 9. Objetivos a detectar.

Se pretende que el sistema diseñado detecte a los objetivos a distancias razonables, para que su implementación sea más versátil y amplia en diferentes ámbitos. Para ello se procede a implementar el diseño en el que nos basamos, pero con los componentes adecuados a la banda de frecuencia deseada, con el objetivo de conseguir una potencia de transmisión de aproximadamente 27 dBm.

Componente	Potencia de salida, atenuación o ganancia
Oscilador (VCO)	6 dBm
Atenuador (ATT)	-3.2 dB
Amplificador de potencia (PA)	14 dB
Divisor (SPLTR)	-3.2 dB
Amplificador de bajo ruido (LNA)	14 dB
Mezclador (MXR)	-6 dB

Tabla 10. Componentes a 9.5 GHz.

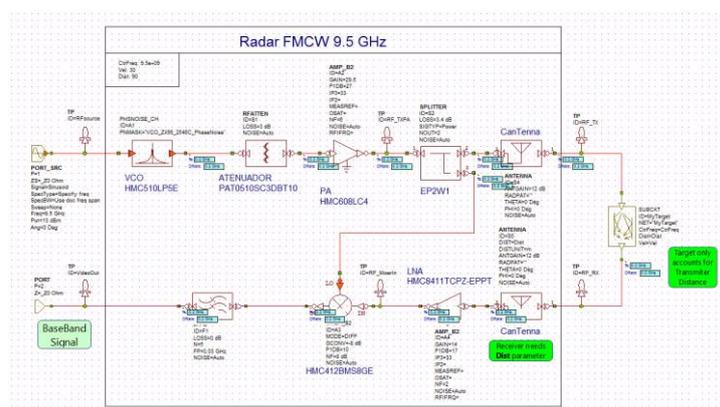
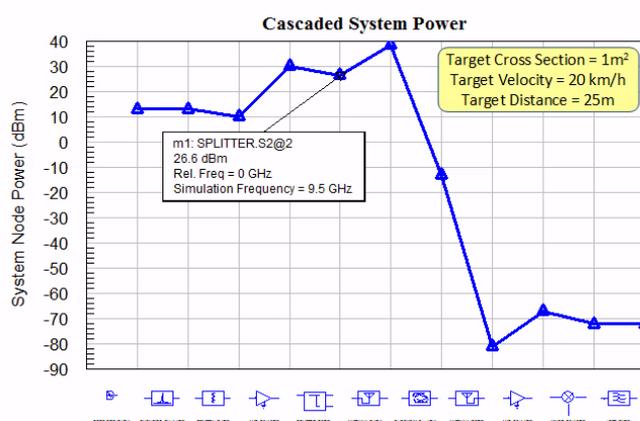


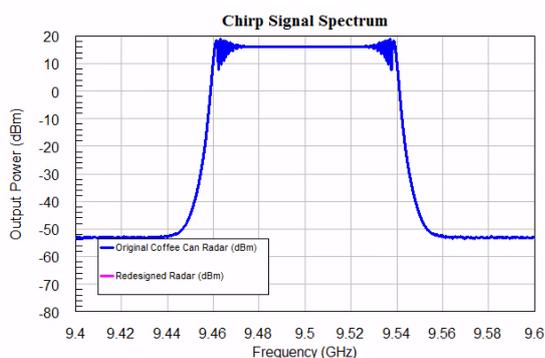
Diagrama 6. Radar FMCW a 9.5 GHz.

Para el primer caso se pretende calibrar el sistema, simulandolo con la intención de detectar a una persona y ver si es capaz de detectarla a una distancia de 25m con una velocidad de 20km/h., para ello previamente hay que comprobar la potencia de transmisión a la que se encuentra nuestro diseño con estas características.



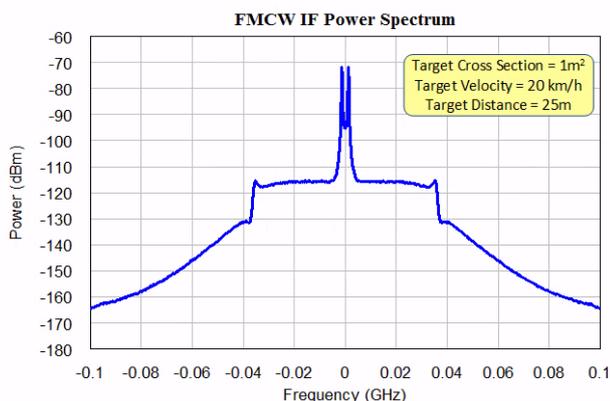
Gráfica 5. Sistema de potencia.

Tal y como se puede observar, se consigue la potencia de transmisión que se definía en el capítulo 4 de alternativas y soluciones. Para las posteriores simulaciones se va a seguir el mismo procedimiento que en el diseño a 2.4 GHz, donde para comprobar su correcto funcionamiento a la frecuencia deseada, se realiza una simulación para verificar el sistema.



Gráfica 6. Espectro de la señal a 9.5 GHz.

Se puede apreciar en la figura como nuestro sistema se encuentra trabajando a una frecuencia centra de 9.5 GHz, la frecuencia deseada, por lo que se podría pasar al siguiente paso en el que se simula la señal a la salida del sistema.

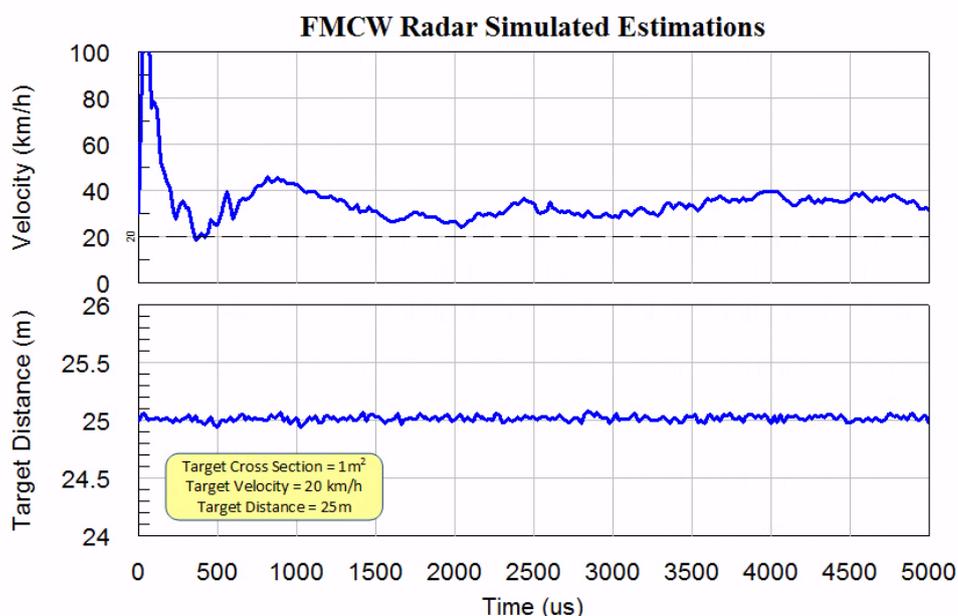


Gráfica 7. Espectro de la señal a Frecuencia Intermedia.

Con los siguientes valores obtenidos se procede a utilizar la etapa de procesado de señal como anteriormente se ha utilizado tras la salida de la señal del sistema, en este punto se realizará la verificación del alcance y velocidad.

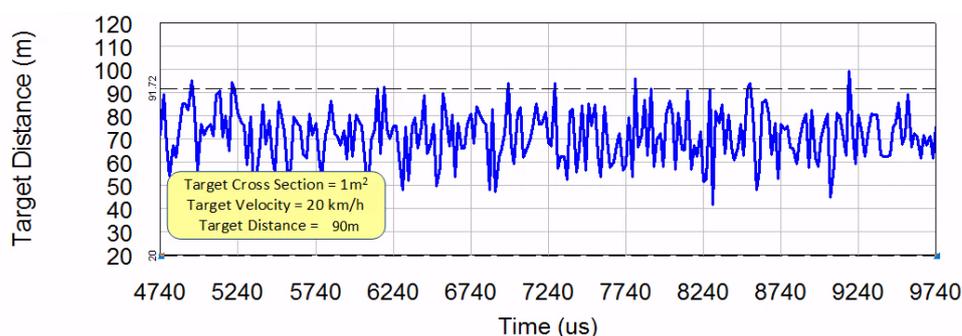
Capítulo 7. Resultados

En este apartado se pretende mostrar el procesado de la señal que se ha obtenido, con el objetivo de conseguir verificar la velocidad y la distancia del blanco/objetivo. Para ello se procede a pasar por la etapa de procesamiento de señal en la que se obtiene los siguientes resultados:



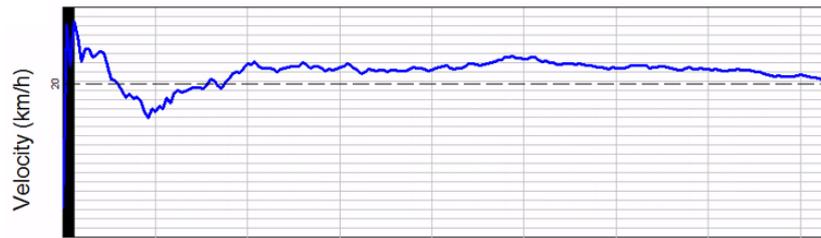
Gráfica 8. Resultados de velocidad y distancia a 9.5 GHz.

Se puede observar como los valores coinciden con los definidos en el blanco, tras realizar esta primera toma de contacto con el sistema, se pretende comprobar las limitaciones de alcance que tiene, por lo que para ello se procede a probar si se es capaz de localizar a una persona a una distancia de 90m.



Gráfica 9. Resultados para un distancia de 90m a 9.5 GHz.

Se confirma el alcance deseado, pero también se puede observar como la precisión con la que se mide la distancia disminuye a medida que se aumenta la distancia, esto es debido al bloque de procesado que se utiliza, ya que es un bloque que nos viene predefinido y que cabría mejorar, pero por ahora nos indica de forma orientativa las limitaciones de nuestro sistema.



Gráfica 10. Resultados de velocidad a 9.5 GHz.

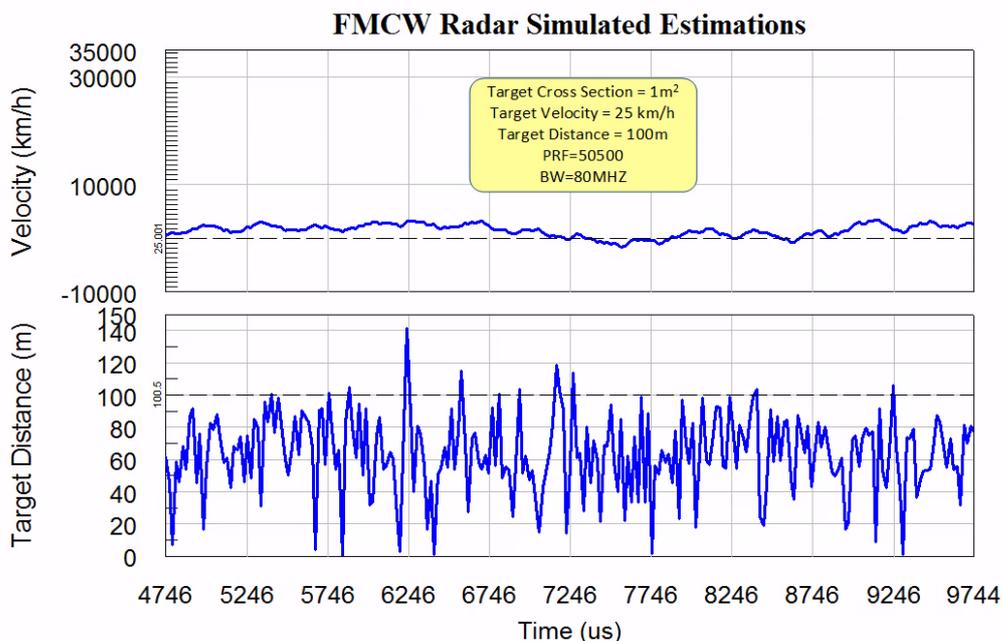
Otra limitación a tener en cuenta y a mejorar en nuestro sistema es la velocidad, ya que se puede observar como la velocidad se mantiene a 20 km/h como al principio, pero sufre variaciones que hacen que oscile y no se tenga una medida más exacta. Tras realizar diferentes simulaciones, se pudo encontrar un módulo que se añadió a la etapa de procesamiento para mejorar y afinar los resultados obtenidos.

Añadiendo este nuevo módulo que recibe el nombre de RF_START, se consigue la capacidad de proporcionar una interfaz entre señales no RF y un enlace RF, hace que se añada un soporte de desajuste de impedancia a un bloque no RF cuando la salida de ese bloque se va a pasar a un bloque RF.



Figura 13. Módulo RF_START.

Con la implementación de este módulo se consigue obtener un alcance de 100m a una velocidad de 25 km/h aproximadamente:



Gráfica 11. Resultado de distancia y velocidad a 100m (9.5 GHz).

Tras comprobar que con la potencia de transmisión de 27 dBm nuestro sistema se encuentra limitado para alcanzar objetivos a distancias de alrededor de 1500m, se plantea aumentar la potencia de transmisión tal y como se vio en el diseño previo, donde tras aplicar la formula de radar se obtuvo una potencia de aproximadamente 60dBm para un alcance de 1500m. Por ello se plantea añadir un nuevo amplificador en serie en la etapa de transmisión para aumentar drásticamente el alcance de nuestro sistema.

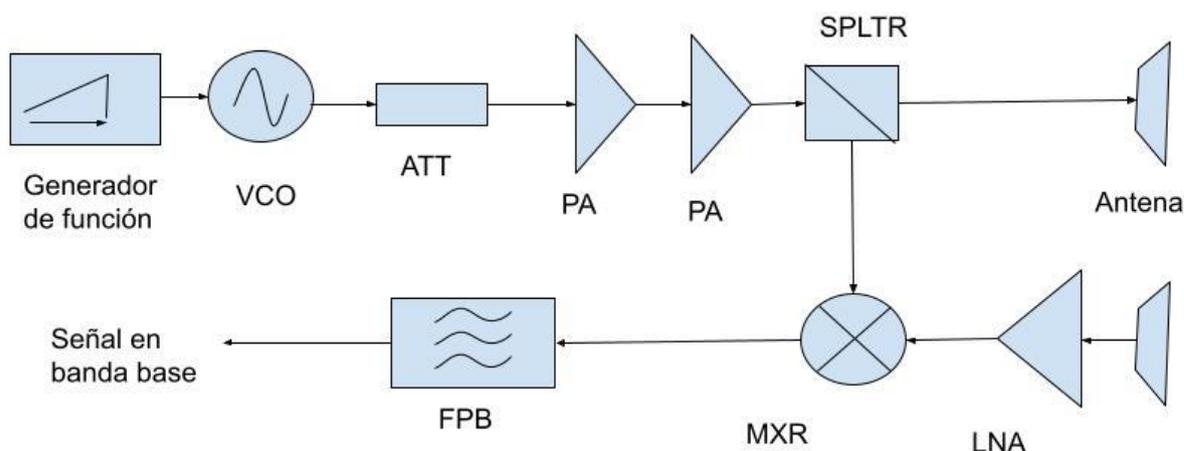
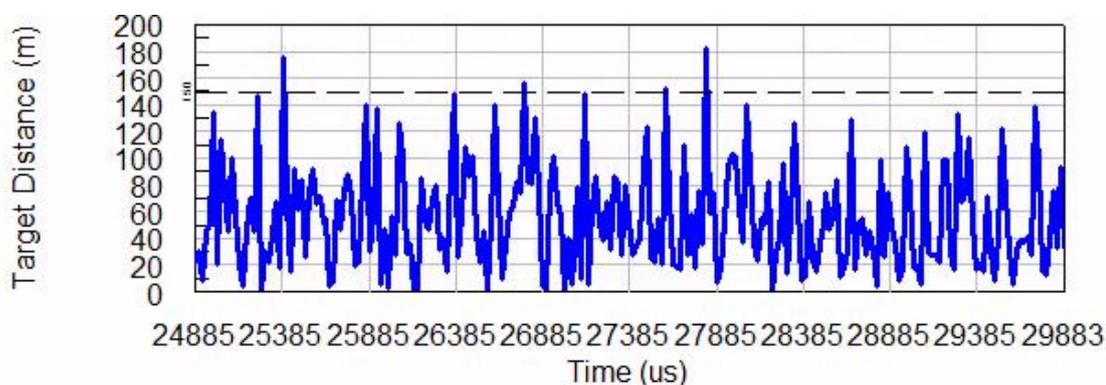


Diagrama 7. Diseño para aumento de potencia en etapa transmisora.

Una vez realizado la búsqueda de los candidatos, se procede a añadirlos y ver que componente tiene un mejor comportamiento, además de modificar el ancho de banda del FPB, aumentándolo hasta una frecuencia de 0.09GHz, con la idea de obtener una mejora en cuanto al alcance. Probamos en primer lugar con el siguiente amplificador:

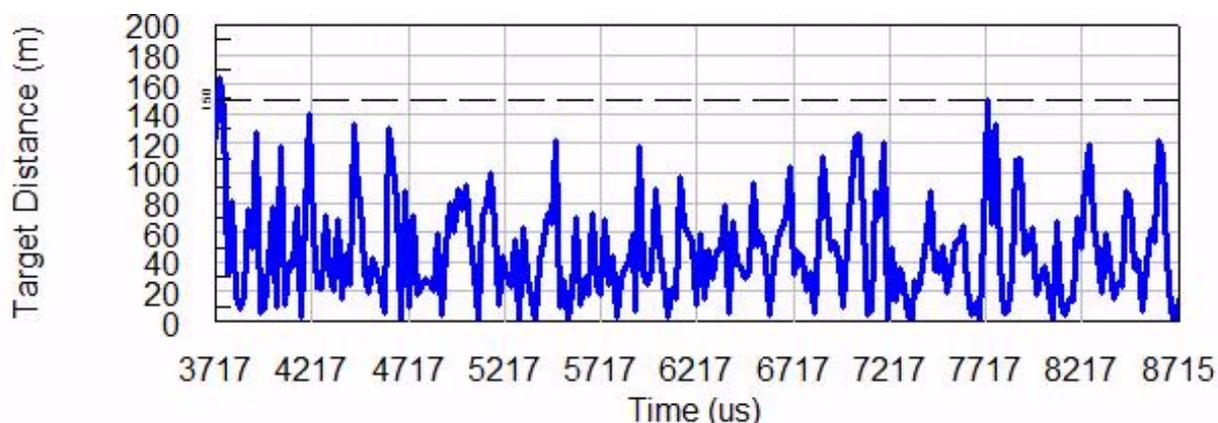
Componentes	Potencia de salida, atenuación o ganancia	\$	Enlaces
AP 772-TGA2312-FL	13dBm	44.18\$	https://www.mouser.es/datasheet/2/412/GA2312-FL-1510328.pdf

Tabla 11. Candidato AP.



Gráfica 12. Resultados con nuevo amplificador TGA2312-FL.

Se procede a añadir el mismo amplificador HMC608LC4 y se obtienen los siguientes parámetros:



Gráfica 13. Resultados con amplificador HMC608LC4.

Se observan resultados muy parejos, ocasionando resultados no acordes a lo esperado. Llegados a este punto, se procede a cambiar el amplificador por otro modelo de mejores prestaciones y con mayor ganancia, con la intención de obtener una mayor potencia de transmisión.

Al obtener un amplificador con mejores características hace que el competente aumente considerablemente de precio, dando lugar a mejoras en los resultados en comparación con los casos anteriores.

El amplificador que se ha seleccionado tiene las siguientes características:

Componente	Ganancia	NF	Precio	Enlace
AP 772-QPM6000SR	25dB	1.6dB	332.31€	https://www.mouser.es/ProductDetail/Oorvo/OPM6000SR?qs=MvNHZd0qoQL9dpKY%252BaDk5g%3D%3D

Tabla 12. Candidato AP.

Como se ha definido anteriormente, la sección recta radar que se define para un aerotaxi es de 10m^2 , se define este valor ya que se va a realizar la simulación para la detección de un aerotaxi, esto facilita la detección del blanco ya que permite obtener mayor rango de distancia. Con estos cambios se procede a simular el siguiente circuito:

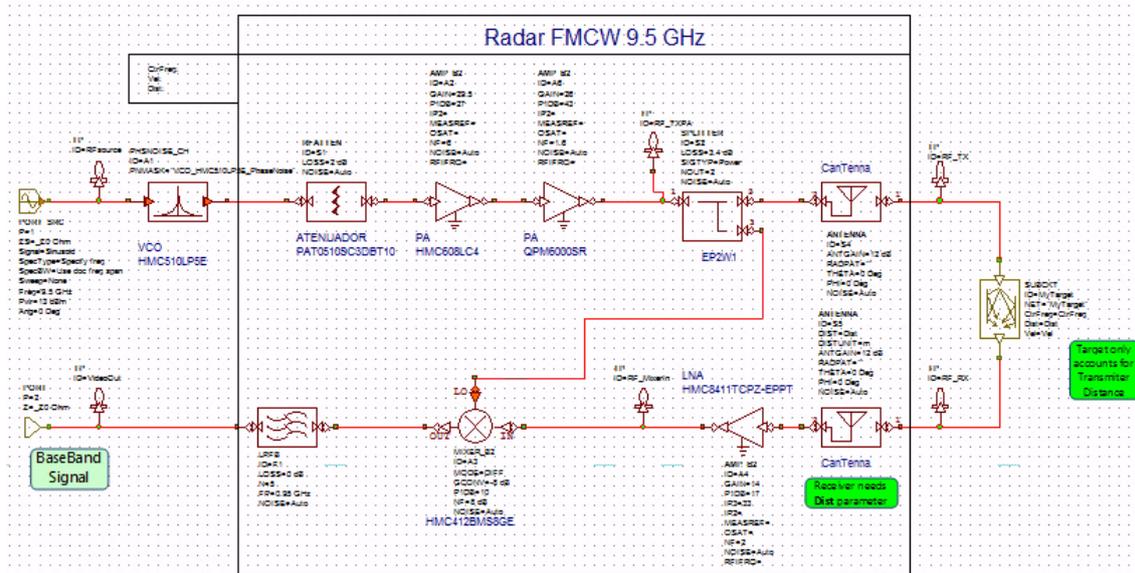
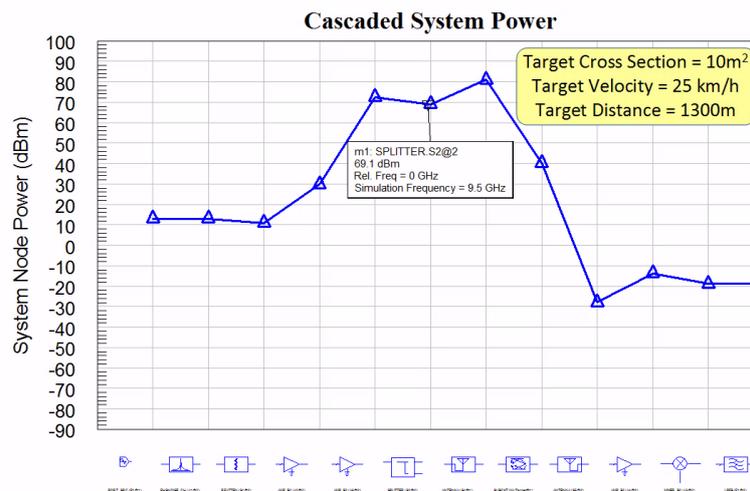


Diagrama 8. Radar FMCW a 9.5 GHz con amplificador QPM6000SR.

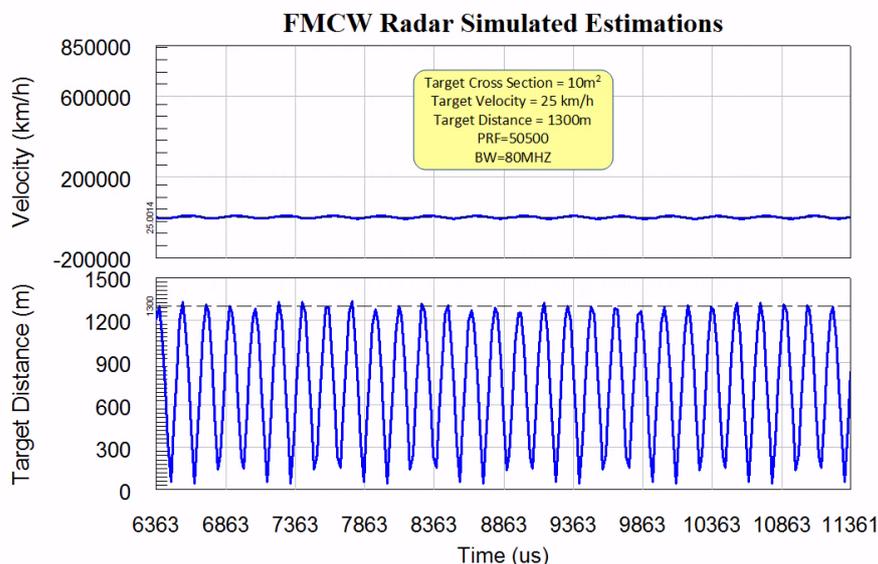
Del esquemático que se muestra se realiza el balance de potencias, para comprobar el correspondiente aumento de potencia en la etapa de transmisión. El objetivo de esta potencia era de unos 60 dBm tal y como se había calculado en el diseño previo. Tras la simulación se obtiene una potencia de transmisión aproximada de 69dBm, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Gráfica 14. Sistema de potencia con amplificador QPM6000SR.

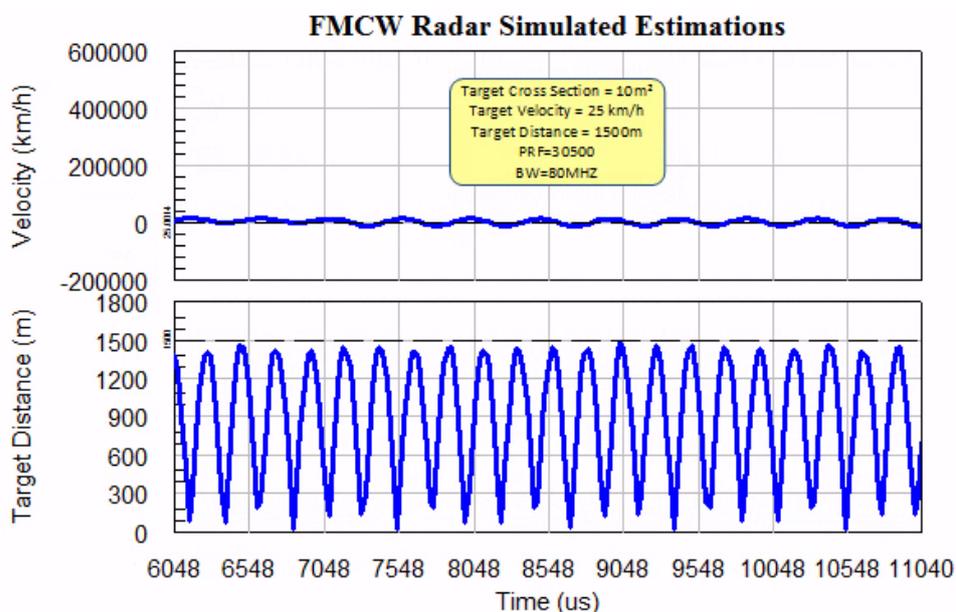
Con esta potencia de transmisión teóricamente no habría ningún problema para alcanzar el objetivo de detectar un aerotaxi a una distancia de 1500m. Tras obtener este resultado favorable se procede a medir a la salida del sistema y procesar la señal para verificar los valores deseados.

Con la potencia de transmisión que se obtiene, se consigue un alcance aproximado de 1300m a una velocidad de 25km/h, la aproximación más cercana para la detección de aerotaxis a 1500m.



Gráfica 15. Resultados con nuevo amplificador en serie en etapa de transmisión.

Tras los resultados obtenidos, se irá modificando algunos parámetros tales como el PRF y el ancho de banda para conseguir alcanzar los deseados 1500m. Tras realizar estos ajustes se realiza la siguiente simulación, donde se aprecia el correcto funcionamiento del radar al alcanzar un objeto de 10m² a una distancia de 1500m.

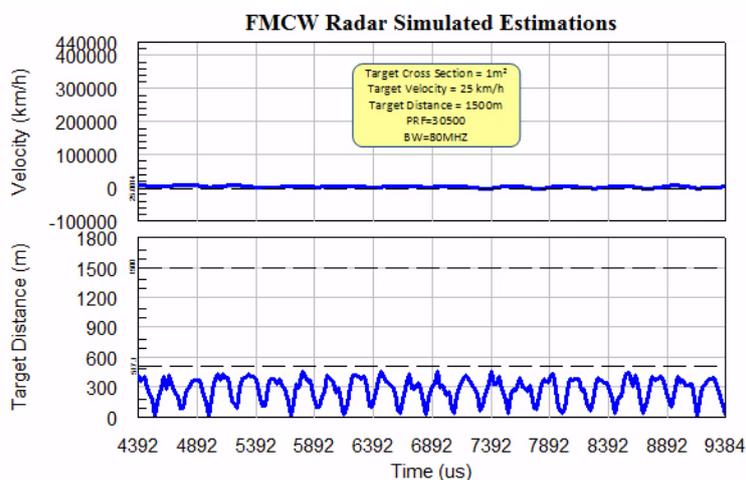


Gráfica 16. Resultados para detección de una aeronave.

Tras conseguir el alcance deseado se procede a realizar simulaciones con diferentes blancos, con el objetivo de comprobar nuestro sistema y su alcance en función de los metros cuadrados que ocuparía diferentes blancos.

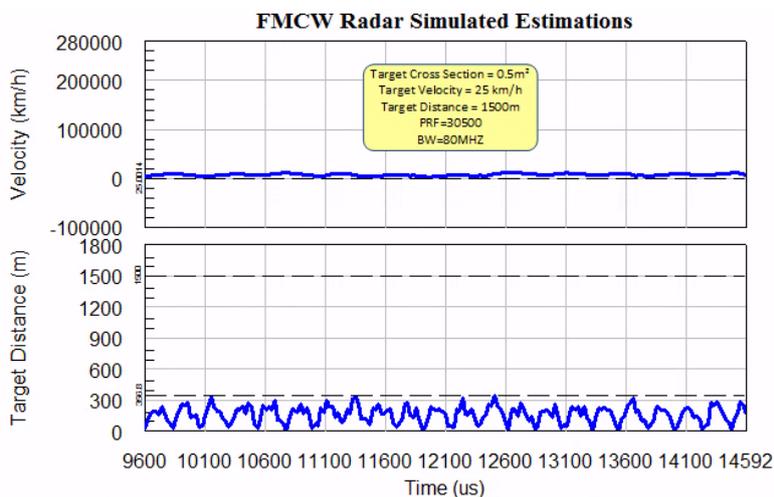
Para realizar esta simulación se ha tenido en cuenta la sección recta radar equivalente a una persona, la cual representa un RCS equivalente a 1m². A continuación, veremos que al tratarse de un objetivo/blanco más pequeño, la capacidad de alcance de nuestro sistema pierde eficiencia, lo

que conlleva a una pérdida de alcance, dando lugar a una detección de aproximadamente 500m. Esto quiere decir que nuestro sistema sería capaz de detectar a una persona a 500m, si la persona supera esta distancia de detección el radar no será capaz de poder localizarla, ya que se encontraría fuera del rango de alcance.



Gráfica 17. Resultados para detección de una persona.

Como se ha apreciado en la simulación de una persona, el rango de alcance se ve reducido a medida que el blanco es más pequeño. Como última simulación se ha querido representar una sección recta radar equivalente a $0.5m^2$, esta área equivale aproximadamente a la figura de un dron comercial estándar.



Gráfica 18. Resultados para detección de un dron.

Tal y como se puede observar, la distancia se ve reducida a un alcance de 360m, fuera de este valor el dron sería indetectable para nuestro sistema.

Capítulo 8. Consideraciones y Conclusiones

8.1 Consideraciones del diseño

Dentro de este apartado se pretende definir las conclusiones que se han obtenido tras realizar este trabajo, por lo que se conseguirá aclarar de forma concisa si se han alcanzado los objetivos marcados. Recapitulando en el objetivo de este trabajo fin de grado, se podría decir que se ha alcanzado con éxito, ya que la creación de un sistema radar capaz de medir distancia y velocidad se ha realizado con éxito, para realizarlo se ha tenido que considerar las limitaciones que nos encontrábamos a la hora de diseñar el radar.

1. En primer lugar, se ha tenido en cuenta el tamaño de las antenas implicadas en el diseño, así como su forma y su ganancia, cabe recordar que se disponía de una antena diseñada por un compañero, Javier Ruiz Alapont, la cual tiene una ganancia de aproximadamente 13 dB y un tamaño cilíndrico con un diámetro de 9cm, a continuación, se muestra la forma de la antena a la que el sistema se debía acoplar.

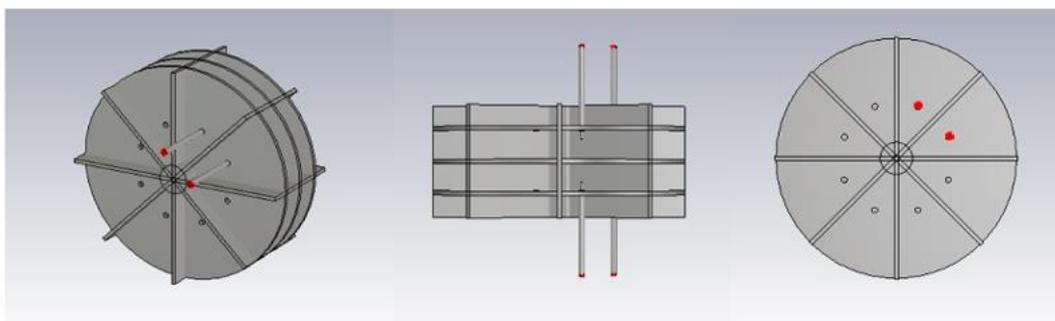


Figura 14. Antena para diseño radar FMCW.

Se puede observar cómo se trata de un sistema pequeño, idóneo para adaptarse a aerotaxis o drones comerciales, con el objetivo de no ser una carga sino una herramienta funcional para la detección de otras aeronaves u obstáculos.

2. En segundo lugar, se ha tenido en cuenta que el diseño trabaje a bandas de frecuencias reglamentarias de libre uso, como es el caso de 24GHz, la banda de trabajo planteada en un comienzo, esta banda cumplía todos los requisitos para la implementación del diseño, sólo que a la hora de encontrar componentes reales que trabajen a la frecuencia de 24 GHz fue una limitación, en particular para el VCO, por lo que se decidió trabajar en banda X para facilitar el diseño y la viabilidad del sistema. En particular se planteó realizar el sistema para que trabaje a la frecuencia de 9.5GHz, una banda utilizada para la radionavegación, apta para el uso Civil-Militar, esto se corroboró con un documento de bandas de frecuencias aplicadas a España, aportada por el ministerio de defensa.

3. La tercera consideración que se plantea a la hora de realizar el diseño es la capacidad de detectar un aerotaxi con un RCS equivalente a 10m^2 , para poder detectar este tipo de aeronave, se define el alcance que debería tener el radar para evitar una colisión, esto se define con ayuda del documento [ED-267], donde se define el volumen de cobertura de una aeronave.

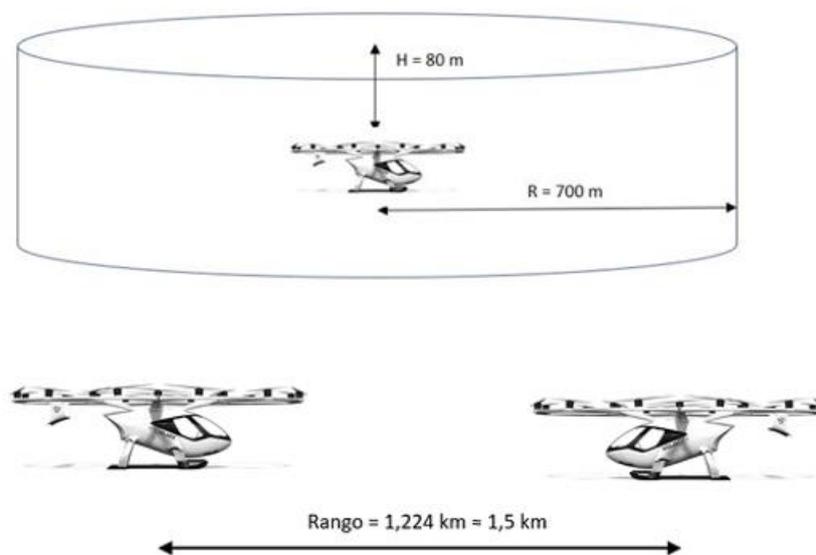


Figura 15. Rango entre aeronaves para evitar colisión.

Con estas dimensiones se define el alcance que debe tener el radar, un alcance de aproximadamente 1500m para localizar a otras aeronaves y así dar información al piloto para que este sea capaz de realizar las maniobras oportunas.

4. La cuarta consideración a tener en cuenta es la velocidad fijada, que se encuentra entrono a 25 km/h , esta velocidad viene definida por la capacidad de estos vehículos aéreos a transportar persona o paquetería sin suponer un peligro.

8.2 Conclusiones

A lo largo de la realización de este trabajo fin de grado, se ha podido ir comprendiendo de una mejor manera, el funcionamiento de un sistema radar, así como sus limitaciones en distancia y tamaño del objetivo, además de la localización de sus componentes reales, fundamentales para poder implementar y modelizar nuestro sistema, se ha podido captar en que sintonía de funcionamiento trabajan ciertos componentes y sus limitaciones en alta frecuencia. Por otro lado, pero no menos importante, la potencia de transmisión que se utiliza en el sistema ha ido aumentando crecientemente con el fin de obtener los resultados esperados, tal y como se define en la ecuación del radar, por lo que se concluye que una mayor potencia aporta una mayor distancia de detección.

Finalmente Se ha podido concluir que para la localización de objetos con una sección recta radar superior a 10m^2 el sistema que se ha diseñado tendrá un mayor alcance en función del objeto que se pretende detectar, por el contrario, si el objetivo es muy pequeño, la detección de éste será indetectable si se encuentra a largas distancias del orden de kilómetros.

Capítulo 9. Líneas futuras

En este apartado se pretende definir las líneas futuras del proyecto, que consisten en poder realizar en placa de circuito impreso el diseño modelado, con el fin de poder verificar de manera real las características del radar y ver sus limitaciones, para ello se pretende mostrar un ejemplo de paso de diseño teórico a placa de circuito impreso, teniendo en cuenta que el sistema diseñado se tiene que acoplar a la antena diseñada por mi compañero Javier Ruiz Alapont.

A continuación, se muestra un ejemplo con un diseño realizado a una frecuencia de 2.4 GHz y el paso del diseño teórico a la implementación en circuito impreso.

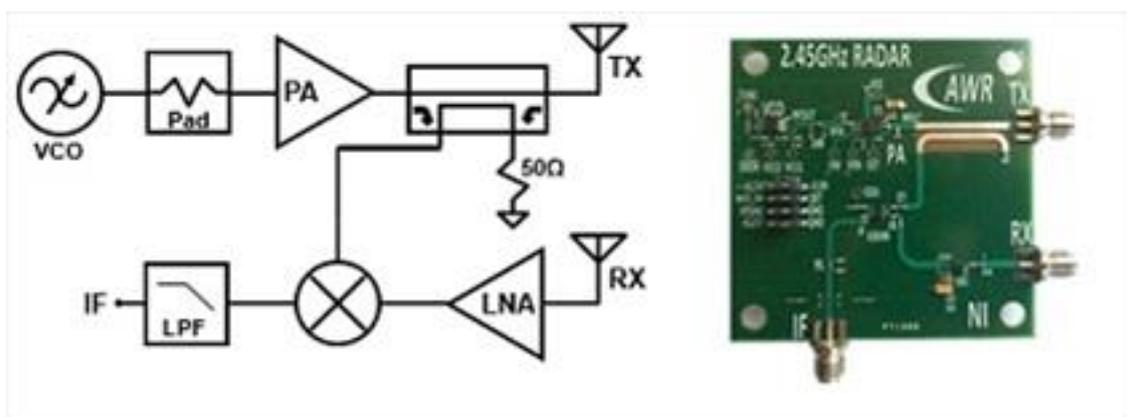


Figura 16. Diseño para líneas futuras.

Tal y como se puede observar, en comparativa con nuestro diseño habría que realizar algún cambio en los componentes para adaptarlo con líneas de transmisión para conseguir una mejor estética y así poder aumentar los conocimientos en esta área.

Capítulo 10. Relación del trabajo con los ODS de la agenda 2030

El ámbito que trata este Trabajo Fin de Grado son los radares y sus diferentes aplicaciones, en este caso se trata el tema sobre un radar embarcado en una aeronave, una de muchas aplicaciones que tienen los radares, que como se ha visto hay de diferentes tipos en función de la aplicación que se pretende abarcar, por esta razón los radares y aeronaves pueden desempeñar un papel muy significativo en la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Agenda 2030. A continuación, se va a mostrar algunas implicaciones y contribuciones que poseen para hacer más asequibles o funcionales algunos de los objetivos marcados por la ODS.



Figura 17. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

- 1) Objetivo 2 (Hambre cero). Los radares embarcados en aeronaves pueden ser de utilidad para monitorear y gestionar la agricultura y la seguridad alimentaria. Pueden proporcionar información valiosa sobre la humedad del suelo, la detección de plagas y evitar así enfermedades en los cultivos, lo que permite una gestión más eficiente de la producción agrícola. Por otro lado, cabe destacar que se podría llevar alimentos a lugares de difícil acceso, que se encuentran en lugares remotos con la ayuda de drones o aeronaves de características similares, contribuyendo así al hambre cero.
- 2) Objetivo 3 (Salud y bienestar). Dentro de este objetivo los radares cumplen una gran función. Por un lado, se encuentran los radares meteorológicos capaces de monitorear y predecir patrones climáticos, como tormentas y precipitaciones intensas, con la detección temprana de estos patrones las autoridades sanitarias pueden tomar medidas preventivas y de control. Los radares médicos pueden utilizarse para la detección de enfermedades cardiovasculares al poder medir la frecuencia cardíaca y la presión arterial de forma no invasiva. Por último, los avances en el ámbito de los radares y las telecomunicaciones facilitan la implementación de sistemas de telemedicina y tele diagnóstico, esta idea se hace factible mediante la implicación de un dron, consiguiendo de esta forma recopilar y transmitir datos médicos del paciente, esto es idóneo para pacientes que se en lugares de difícil acceso o en áreas con recursos limitados y en situaciones donde el acceso a la atención médica es difícil.



- 3) Objetivo 7 (Energía asequible y no contaminante). Los radares pueden contribuir a la generación de energía renovable, como la energía eólica y solar, esto lo pueden conseguir al proporcionar datos sobre el viento, la radiación solar y las condiciones atmosféricas. Esto ayuda a identificar ubicaciones óptimas para la instalación de parque eólicos y plantas solares, consiguiendo la máxima eficiencia energética.
- 4) Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura). Los radares son esenciales en la gestión del tráfico aéreo y marítimo, permitiendo un transporte seguro y eficiente. Además, los radares pueden utilizarse en la inspección y el monitoreo de infraestructuras críticas como puentes, presas y edificios, garantizando integridad y seguridad.
- 5) Objetivo 11 (Ciudades y comunidades sostenibles). Los radares pueden desempeñar un papel importante en la planificación urbana y la gestión del tráfico en las ciudades, ya que son capaces de poder aportar información en tiempo real sobre el flujo de tráfico, el monitoreo de la calidad del aire y la detección de deslizamientos de tierra, contribuyendo así a un desarrollo urbano sostenible y una mayor calidad del aire.
- 6) Objetivo 13 (Acción por el clima). En este objetivo los radares pueden ayudar a predecir el clima y fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes tormentas e inundaciones. Esto facilita una respuesta temprana a estos fenómenos, permitiendo medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.



Capítulo 11. Bibliografía

[1]	http://es.cdleader-mw.com/info/basic-knowledge-of-radar-scattering-cross-sect-39995002.html
[2]	https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/P/D/PDF472.pdf
[3]	https://www.diariomotor.com/que-es/evtol/
[4]	https://controldron.com/alphabet-drones/
[5]	https://www.redalyc.org/journal/5055/505565143007/html/
[6]	https://www.analog.com/en/products/ad9911.html#product-overview
[7]	EUROCAE, ED-267 Operational services and environment definition (OSED) for detect and avoid in very low-level operations
[8]	Radar Handbook, Merrill Skolnik, introduction to radar systems
[9]	Radar signatures of small consumer Drones, J. Li and Hao Ling
[10]	https://egresadoselectronicaunc.blogspot.com/2019/11/como-funciona-el-radar.html
[11]	https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp05.es.html
[12]	https://www.studocu.com/es/document/universidad-politecnica-de-madrid/tecnologias-radar/examen-abril-2016-preguntas-y-respuestas/6077457
[13]	https://www.digikey.es/es/articles/the-basics-of-voltage-controlled-oscillators-vcos
[14]	https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design.html
[15]	Ángel Sánchez Navarro “Desarrollo de un concepto de radar para su integración en sistemas de Detect and Avoid de aeronaves no tripuladas”
[16]	Ramón Líaño Cuquerella “Fabricación y puesta en marcha de un radar FMCW de bajo coste en banda S”
[17]	https://www.radartutorial.eu/19.kartei/03.atc/pubs/surface_movement_radar.pdf
[18]	https://www.xataka.com/otros/drones-mensajeros-amazon-prime-air-despegan-al-fin-han-tardado-casi-decada-hacerlo
[19]	https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/avion-electrico-evtol-rotor-horizontales-pruebas-vuelo-real_68660_102.html