



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

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Análisis y desarrollo de un sistema de detección de drones  
mediante radar pasivo basado en señales de DVB-T.*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Lydia Martínez del Pino

**DIRECTOR:** Rubén Nocelo López

**CURSO ACADÉMICO:** 2024-2025

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis y desarrollo de un sistema de detección de drones  
mediante radar pasivo basado en señales de DVB-T.*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



## **RESUMEN**

El avance de los sistemas de telemetría y sensorización en la última década ha impulsado la rápida proliferación de pequeñas plataformas de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) o drones, que pueden representar una potencial amenaza para los sistemas tradicionales de seguridad y defensa de un país, debido a su escaso tamaño y su alta maniobrabilidad.

En consecuencia, el desarrollo en la capacidad de detección de estos pequeños vehículos aéreos a tiempo y a una distancia adecuada, con el fin de prevenir o mitigar posibles ataques, se presenta como una oportunidad de interés, sobre todo dentro del ámbito militar.

Entre los diferentes métodos de detección, los sistemas basados en tecnología radar en general, y en tecnología de radar pasivo en particular, presentan la ventaja de ser robustos en entornos no controlables como pueden ser condiciones meteorológicas adversas y de escasa visibilidad, de noche o en entornos abiertos. Por ello, en este TFG, se propone el análisis y el desarrollo de un sistema de detección de blancos que presenten una RCS reducida, tales como pueden ser los drones, basado en radar pasivo, usando señales de DVB-T como iluminador de oportunidad.

## **PALABRAS CLAVE**

Detección Drones, Radar Pasivo, DVB-T, Iluminador de Oportunidad, RCS.



# AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de final de grado constituye la conclusión de una etapa crucial en mi vida, cinco años de formación académica y profesional en la Escuela Naval Militar que han dejado una profunda huella en mi desarrollo tanto personal como militar. A lo largo de este periodo, he tenido la oportunidad de vivir experiencias inolvidables, pero también he enfrentado diversos desafíos que, de no haber contado con el apoyo y la compañía de las personas que a continuación mencionaré, habrían resultado considerablemente más complejos.

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, el profesor D. Rubén Nocelo López por la ayuda prestada desde el primer día, proporcionándome sus conocimientos para mejorar el presente trabajo, manteniéndose incansable ante las numerosas horas de laboratorio empleadas y por su disponibilidad en todo momento, lo que ha hecho posible su correcto desarrollo.

En segundo lugar, agradecer a mi familia, en especial a mis padres, quienes han sido, son y serán un modelo a seguir tanto en lo profesional como en lo personal. Su ejemplo de dedicación y sacrificio en el día a día ha sido una inspiración constante en mi vida. Recalcar la especial ayuda de mi madre en el presente trabajo, compartiendo sus conocimientos y ayudándome a mejorarlo. A mi hermano, quien es mi referente más cercano, siempre apoyándome y estando presente en todo momento, facilitándome ayuda tanto en conocimientos como personalmente. Además, agradecer todo el apoyo a mis tíos y abuelos, quienes siempre están dispuestos a ayudar pese a los malos momentos que ellos puedan estar pasando.

Además, agradecer el apoyo continuo durante estos cinco años de mis amigos y compañeros, quienes han estado a mi lado durante todo el proceso de formación y me han ayudado a aprender y crecer como persona y profesional.

No puedo terminar los agradecimientos sin antes mencionar a Guillermo Gálvez Burgoa, quien, desde su conocimiento de mi vocación militar, ha estado apoyándome en todas las etapas y proporcionándome sus sabios consejos, tanto militares como personales y mejorando cualquier situación gracias a su humor. Siendo, de esta manera, un ejemplo a seguir en ambos aspectos de la vida.

Finalmente, y probablemente lo más significativo para mí, deseo dedicar el trabajo a mi abuelo Jesús, quien aumentó en mí el deseo de escoger esta profesión, proporcionándome ejemplos de sacrificio y dedicación y que, desde el año pasado, continúa brindándome su apoyo desde el Cielo, junto con mi abuela Mari. Admirándole y valorándole profundamente, ha sido siempre una fuente de fortaleza, permitiéndome superar todas las dificultades que se me han presentado, incluso en sus momentos de mayor debilidad.



## CONTENIDO.

Contenido. ....	3
Índice de Figuras. ....	5
Índice de Tablas. ....	9
Listado de Acrónimos. ....	10
1 Introducción y objetivos. ....	12
1.1 Motivación. ....	12
1.2 Objetivos. ....	14
1.3 Estructura del trabajo. ....	14
2 Estado del arte. ....	16
2.1 Los vehículos aéreos no tripulados. ....	16
2.1.1 Materiales empleados en micro drones. ....	20
2.2 Conflicto Ucrania-Rusia. ....	21
2.3 Métodos de detección de drones. ....	24
2.3.1 Comparación. ....	29
2.3.2 Conclusiones. ....	30
2.4 Aplicaciones de los drones. ....	31
3 Radar Pasivo. ....	32
3.1 Evolución del radar pasivo a lo largo de la historia. ....	32
3.2 Principio de operación del radar pasivo. ....	33
3.2.1 Descripción del escenario. ....	33
3.2.1.1 Distancia biestática y diferencia de tiempo de llegada (TDOA). ....	34
3.2.1.2 Diferencia de frecuencia de llegada (FDOA). ....	36
3.2.1.3 Matriz rango-Doppler. ....	37
3.2.1.4 Parametrización de la SNR. ....	38
3.2.2 Iluminadores de oportunidad. ....	39
3.3 Detección en 3D. ....	41
3.4 Sección equivalente radar de un dron. ....	42
4 Desarrollo del trabajo. ....	45
4.1 Parametrización del sistema de radar pasivo. ....	45
4.1.1 Ancho de banda. ....	46
4.1.2 Intervalo de procesamiento coherente. ....	47
4.1.3 Frecuencia de la señal. ....	48
4.1.4 Parámetros para simulación con señales sintéticas. ....	53

4.2 Dispositivos empleados.....	54
5 Resultados / Validación / Prueba.....	59
5.1 Resultados simulados a partir de señales sintéticas. ....	59
5.1.1 Simulación de detección de un dron en movimiento en tres dimensiones. ....	59
5.1.2 Comprobación cambio Doppler al cruzar la línea transmisor-receptor.....	59
5.1.3 Simulación a partir de señales sintéticas de DVB-T. ....	61
5.1.4 Simulación con contactos de RCS -20 dBsm. ....	62
5.1.5 Simulación con contactos de RCS -30 dBsm. ....	64
5.2 Resultados obtenidos a partir de campaña de medidas. ....	66
5.2.1 Detección de un barco. ....	67
5.2.2 Detección de un mini dron.....	68
5.2.2.1 Detección dron mayores dimensiones y velocidad.....	68
5.2.2.2 Detección de blanco usando un ancho de banda de 16 MHz. ....	69
5.2.2.3 Análisis detección variando el valor del <i>TCPI</i> . ....	69
5.2.2.4 Detección empleando cuatro canales de televisión de mayor frecuencia.....	71
5.2.3 Detección de dos mini drones simultáneamente.....	71
5.2.4 Representación en un mapa de coordenadas ....	73
6 Conclusiones y Líneas Futuras.....	75
6.1 Conclusiones de los objetivos iniciales.....	75
6.2 Líneas futuras.....	76
7 Bibliografía.....	78
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales. ....	83
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales. ....	84
Anexo III: Interfaz Gráfica: Pofacets. ....	85
Anexo IV: Código Simulaciones Matlab. ....	93
Anexo V: Resultados Completos de las Simulaciones.....	95
A) Simulación con contacto de RCS (-20 dBsm). ....	95
B) Simulación con contacto de RCS (-30 dBsm). ....	100
Anexo VI: Resultados Medidas Reales. ....	110
Anexo VII: Representación de los Óvalos de Cassini.....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1-1. Operadores UAS registrados en AESA [1].	12
Figura 2-1. Queen bee [22].	16
Figura 2-2. Tu-123 Yástreb [25].	17
Figura 2-3. MQ-9 Predator B [31].	17
Figura 2-4. RQ-4 Global Hawk [32].	18
Figura 2-5. Diferencia entre dron, UAS, UAV, UAM y SUAS [34].	19
Figura 2-6. Dron Byraktar TB2 [3].	22
Figura 2-7. Dron DJI Mavic 3 [3].	23
Figura 2-8. Dron Orlan-10 [43].	23
Figura 2-9. Dron Shahed-136 [44].	23
Figura 2-10. Espectro electromagnético [8].	25
Figura 2-11. Funcionamiento radar activo [47].	27
Figura 2-12. Esquema de la geometría PCL [48].	27
Figura 3-1. Bombardero Heyford [55].	32
Figura 3-2. Distancias representativas radar biestático [59].	34
Figura 3-3. Elipse con focos en Tx y Rx [59].	35
Figura 3-4. Determinación de movimiento con radar biestático [59].	36
Figura 3-5. Matriz rango-Doppler bidimensional.	38
Figura 3-6. Matriz rango-Doppler tridimensional.	38
Figura 3-7. Óvalo de Cassini [61].	39
Figura 3-8. Localización de antenas FM en Europa [10].	40
Figura 3-9. Cobertura de señal de televisión digital [10].	40
Figura 3-10. Representación movimiento tres contactos en 3D.	41
Figura 3-11. RCS cambiante según el lugar de incidencia de las ondas.	42
Figura 3-12. Sección radar equivalente para diferentes tipos de blancos [63].	42
Figura 3-13. Variación de la RCS según la frecuencia radar [64].	43
Figura 3-14. Página principal Pofacets.	43
Figura 4-1. Representación distancias contacto.	46
Figura 4-2. Esquema de la geometría biestática en coordenadas cartesianas 2D [48].	47
Figura 4-3. Archivo CAD importado (.STL) [69].	48
Figura 4-4. Representación dron en las tres dimensiones.	49
Figura 4-5. Representación RCS para diferentes frecuencias y ángulos de incidencia.	50
Figura 4-6. Dos canales reales captados con las antenas receptoras.	51
Figura 4-7. Rango de dos canales empleados en las pruebas de detección.	51

Figura 4-8. Cuatro canales reales captados con las antenas receptoras.....	52
Figura 4-9. Rango de cuatro canales empleados en las pruebas de detección. ....	52
Figura 4-10. Drones empleados en las mediciones. ....	54
Figura 4-11. Mando de control del dron.....	55
Figura 4-12. Localización antenas [72]. ....	56
Figura 4-13. Antenas pasivas empleadas (cuatro receptoras más la de referencia). ....	56
Figura 4-14. Antena de referencia. ....	57
Figura 4-15. Array de cuatro antenas. ....	57
Figura 4-16. Transceptor USRP X310 para la recepción de las señales en mediciones reales. ....	58
Figura 4-17. Receptor GPS. ....	58
Figura 5-1. Representación contactos en 3D. ....	59
Figura 5-2. Representación del cambio de signo de la frecuencia Doppler. ....	60
Figura 5-3. Cambio de signo frecuencia Doppler en contacto atravesando la línea base. ....	61
Figura 5-4. Representación movimiento tres contactos. ....	62
Figura 5-5. Óvalos de Cassini del escenario real. ....	62
Figura 5-6. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 1 s). ....	63
Figura 5-7. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 10 s). ....	64
Figura 5-8. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 1 s). ....	65
Figura 5-9. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 10 s). ....	65
Figura 5-10. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 20 s). ....	66
Figura 5-11. Dron volando, efectuándose detección. ....	67
Figura 5-12. Detección dron.....	67
Figura 5-13. Detección lancha en la Ría de Pontevedra, RCS aproximada de -20 dBsm.....	68
Figura 5-14. Detección dron mayores dimensiones. ....	68
Figura 5-15. Detección dron con ancho de banda duplicado. ....	69
Figura 5-16. Detección dron con CPI un segundo. ....	69
Figura 5-17. Detección dron con CPI dos segundos. ....	70
Figura 5-18. Detección dron con CPI tres segundos. ....	70
Figura 5-19. Detección dron con CPI seis segundos.....	70
Figura 5-20. Variación de la SNR en función del CPI. ....	71
Figura 5-21. Detección del dron usando un ancho de banda de 32 MHz.....	71
Figura 5-22. Fotos volando dos drones. ....	72
Figura 5-23. Detección dos drones simultáneamente en dos medidas diferentes. ....	72
Figura 5-24. Mapa rango-Doppler de cada una de las antenas del array. ....	73
Figura 5-25. Detección del dron con el array. ....	73
Figura 5-26. Posicionamiento de las detecciones en un mapa. ....	74

Figura 6-1. Detección contacto a distancia negativa.....	76
Figura A - III - 1. Página principal Pofacets. ....	85
Figura A - III - 2. Importación imágenes a Pofacets. ....	86
Figura A - III - 3. Archivo CAD importado (.STL) [69].....	86
Figura A - III - 4. Representación dron en las tres dimensiones. ....	87
Figura A - III - 5. Cálculo RCS biestática en función del ángulo. ....	88
Figura A - III - 6. Cálculo RCS biestática en función de la frecuencia.....	89
Figura A - III - 7. Cálculo RCS monoestática. ....	89
Figura A - III - 8. Representación gráfica de los parámetros de simulación [74]. ....	90
Figura A - III - 9. Gráficos RCS a 0,4 GHz. ....	90
Figura A - III - 10. Gráficos RCS a 0,55 GHz. ....	91
Figura A - III - 11. Gráficos RCS a 0,67 GHz. ....	91
Figura A - III - 12. Gráficos RCS a 0,4 GHz sin aristas. ....	91
Figura A - III - 13. Gráficos RCS a 0,55 GHz sin aristas.....	92
Figura A - III - 14. Gráficos RCS a 0,67 GHz sin aristas.....	92
Figura A - V - 1. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 1 s). ....	95
Figura A - V - 2. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 2 s). ....	96
Figura A - V - 3. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 3 s). ....	96
Figura A - V - 4. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 4 s). ....	97
Figura A - V - 5. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 5 s). ....	97
Figura A - V - 6. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 6 s). ....	98
Figura A - V - 7. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 7 s). ....	98
Figura A - V - 8. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 8 s). ....	99
Figura A - V - 9. Contacto con RCS -20 dBsm (t = 9 s). ....	99
Figura A - V - 10. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 1 s). ....	100
Figura A - V - 11. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 2 s). ....	101
Figura A - V - 12. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 3 s). ....	101
Figura A - V - 13. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 4 s). ....	102
Figura A - V - 14. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 5 s). ....	102
Figura A - V - 15. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 6 s). ....	103
Figura A - V - 16. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 7 s). ....	103
Figura A - V - 17. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 8 s). ....	104
Figura A - V - 18. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 9 s). ....	104
Figura A - V - 19. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 10 s). ....	105
Figura A - V - 20. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 11 s). ....	105

Figura A - V - 21. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 12 s).	106
Figura A - V - 22. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 13 s).	106
Figura A - V - 23. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 14 s).	107
Figura A - V - 24. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 15 s).	107
Figura A - V - 25. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 16 s).	108
Figura A - V - 26. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 17 s).	108
Figura A - V - 27. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 18 s).	109
Figura A - V - 28. Contacto con RCS -30 dBsm (t = 19 s).	109
Figura A - VI - 1. CPI de un segundo (t=1s).	110
Figura A - VI - 2. CPI de un segundo (t=2s).	110
Figura A - VI - 3. CPI de un segundo (t=3s).	110
Figura A - VI - 4. CPI de un segundo (t=4s).	110
Figura A - VI - 5. CPI de un segundo (t=5s).	111
Figura A - VI - 6. CPI de un segundo (t=6s).	111
Figura A - VI - 7. CPI de dos segundos (t=1s).	111
Figura A - VI - 8. CPI de dos segundos (t=3s).	111
Figura A - VI - 9. CPI de dos segundos (t=5s).	112
Figura A - VI - 10. CPI de tres segundos (t=1s).	112
Figura A - VI - 11. CPI de tres segundos (t=4s).	112
Figura A - VI - 12. CPI de seis segundos.	112
Figura A - VII - 1. Óvalos de Cassini.	114

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2-1. Clasificación UAVs según la OTAN [33]. .....	18
Tabla 2-2. Características drones en el conflicto ruso-ucraniano. ....	24
Tabla 2-3. Ventajas y desventajas de los medios de detección. ....	30
Tabla 3-1. Valores de la frecuencia Doppler según beta y gamma. ....	37
Tabla 4-1. Valor de la RCS en función de la frecuencia y ángulos de incidencia. ....	50
Tabla 4-2. Características drones empleados. ....	55
Tabla 5-1. Variación de la SNR en función del CPI. ....	70
Tabla 6-1. Parametrización para maximizar la resolución en distancia y Doppler. ....	76

## LISTADO DE ACRÓNIMOS.

**2D:** Dos Dimensiones.

**3D:** Tres Dimensiones.

**ABS:** Acroilonitrilo Butadieno Estireno.

**AESA:** Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

**BBC:** British Broadcasting Corporation.

**CAF:** Cross Ambiguity Function.

**CFAR:** Constant False Alarm Rate.

**CPI:** Coherent Processing Interval.

**CW:** Continuous Wave.

**dBsm:** dB relative to a square meter.

**DVB-S:** Digital Video Broadcasting-Satellite.

**DVB-T:** Digital Video Broadcasting-Terrestrial.

**EIRP:** Equivalent Isotropically Radiated Power.

**EO:** Electro-optical.

**FDOA:** Frequency Difference of Arrival.

**FM:** Frequency Modulation.

**FoV:** Field of View.

**GNSS:** Global Navigation Satellite System.

**GPS:** Global Positioning System.

**GUI:** Graphical User Interface.

**IA:** Inteligencia Artificial.

**IAI:** Israel Aerospace Industries.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**INS:** Inertial Navigation System.

**IO:** Iluminador de oportunidad.

**IR:** Infrared Radiation.

**LIDAR:** Light Detection and Ranging.

**LSS:** Low, Slow and Small

**LOS:** Line of Sight.

**LPI:** Low Probability of Intercept.

**MUTES:** Multimodal Unmanned Aerial Vehicles 3D Trajectory Display System.

**OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional.

**OTAN:** Organización del Tratado del Atlántico Norte.

**PCL:** Passive Coherent Locator.

**PLA:** Políácido láctico.

**PO:** Physical Optics.

**RADAR:** Radio Detection and Ranging.

**RCS:** Radar Cross Section.

**REPMUS 22:** Robotic Experimentation and Prototyping augmented by Maritime Unmanned Systems 22.

**RF:** Radio Frequency.

**RFClass:** Radio Frequency Signal Classification.

**RPA:** Remotely Piloted Aircraft.

**RPAS:** Remotely Piloted Aircraft System.

**SNR:** Signal Noise Ratio.

**TDOA:** Time Difference of Arrival.

**UAM:** Urban Air Movility

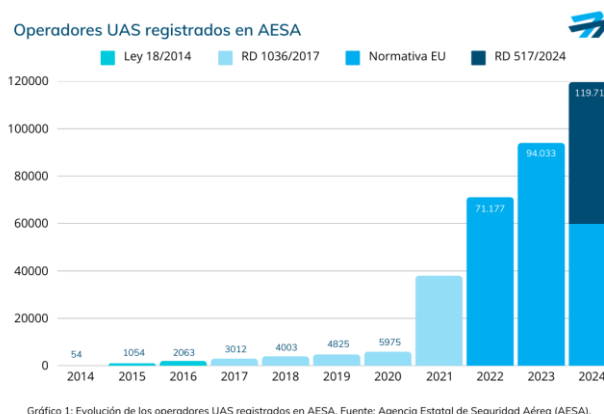
**UAV:** Unmanned Aerial Vehicle.

**WiFi:** Wireless Fidelity.

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

## 1.1 Motivación.

En los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), también conocidos como drones, han experimentado un crecimiento exponencial en su desarrollo y aplicación. Este avance ha sido impulsado por mejoras en tecnologías clave, como la miniaturización de componentes, el perfeccionamiento de los sistemas de navegación autónoma y el desarrollo de sensores y sistemas de comunicación más eficientes. La Figura 1-1 representa el incremento en el número de operadores de drones registrados en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) desde el 2014 hasta el final de 2024 llegando a un total de 119.712 operadores, lo que representa un aumento del 27% respecto al año anterior, registrándose un total de 25.679 nuevos operadores [1]. Se observa una tendencia claramente positiva desde el año 2021. Entre los hitos más destacados del 2024 se encuentran el impulso del uso de sistemas aéreos no tripulados (Unmanned Aerial System, UAS) en el sector fitosanitario y la realización de vuelos en enjambre con hasta 1.000 drones. Cabe señalar que el término UAV está quedando obsoleto, siendo progresivamente reemplazado por la denominación UAS, que abarca tanto el vehículo como sus sistemas de control y operación.



**Figura 1-1. Operadores UAS registrados en AESA [1].**

Además, debe tenerse en cuenta que esta gráfica representa únicamente el número de drones que poseen un tamaño significativo, los cuales necesitan un registro. Los minidrones o aquellos drones con un peso inferior a 249 gramos no están sujetos a esta regulación dificultando su contabilización.

Estos dispositivos, inicialmente concebidos para fines militares, han diversificado su uso en sectores como la agricultura, la logística, el monitoreo ambiental, la cinematografía y la gestión de emergencias [2]. En el ámbito militar, los conflictos recientes, como el enfrentamiento entre Ucrania y Rusia, han transformado el uso de drones en la guerra moderna. Ambas partes los emplean intensivamente tanto para ataques como para reconocimiento. Ucrania utiliza drones comerciales modificados y modelos como el TB-2 Bayraktar, mientras que Rusia despliega drones kamikaze, como el Shahed-136 iraní, en ataques masivos para saturar defensas o el Orlan-10 para misiones de reconocimiento [3]. Estos dispositivos han acelerado la detección y respuesta en el campo de batalla, permitiendo ataques precisos y rápidos, dificultando las maniobras de grandes unidades militares.

En la actualidad, los drones varían desde pequeños dispositivos recreativos hasta plataformas de alta capacidad diseñadas para aplicaciones industriales y de defensa. Sin embargo, su rápida evolución también ha generado preocupaciones en materia de seguridad y privacidad, ya que su tamaño compacto y alta maniobrabilidad dificultan su detección, además de su control. Esto ha llevado al desarrollo de tecnologías avanzadas para la localización, identificación y neutralización de drones, destacando entre ellas los sistemas basados en tecnología radar (Radio Detection and Ranging, RADAR), visión por computadora, detección acústica y análisis de señales de radiofrecuencia. La creciente preocupación por la seguridad ha llevado a organismos internacionales como la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) a organizar diferentes simposios o reuniones de carácter científico para debatir sobre tecnologías para la detección de drones [4], incluyendo el uso de radar pasivo ([5] y [6]).

La detección de drones es un proceso esencial para identificar y rastrear vehículos aéreos no tripulados que puedan representar riesgos para la seguridad, privacidad o infraestructura crítica. A medida que su uso se ha vuelto más común y accesible, las soluciones de detección han evolucionado significativamente. Actualmente existen diferentes métodos de detección de drones entre los que se encuentran la detección de radio frecuencia (RF) [7], cámaras ópticas y térmicas ([8] y [9]), los radares activos y pasivos ([10] y [11]), la detección acústica ([12] y [13]), Light Detection and Ranging (LIDAR) ([14], [15] y [16]) y los sistemas de fusión de sensores que combinan alguna de las técnicas anteriores [17]. Cada método presenta una serie de ventajas e inconvenientes, por lo que se puede recurrir a una combinación de varias de estas técnicas para aumentar la probabilidad de detección.

En el ámbito militar, la discreción, evasión y dificultad de detección de estos dispositivos son factores imprescindibles. Por ello, este trabajo se centra en evaluar la viabilidad de detección de drones mediante radar pasivo, como la tecnología que seguramente presente las mejores prestaciones de detección en entornos no controlables, en la nocturnidad, bajo condiciones meteorológicas adversas, en espacios abiertos, etc. y todo ello con el carácter de alta discreción y baja probabilidad de ser detectados que presenta la tecnología de radar pasivo desde el punto de vista del receptor.

Los sistemas basados en tecnología radar en general, y en tecnología radar pasiva en particular, presentan la ventaja de ser robustos ante condiciones meteorológicas adversas y de escasa visibilidad. Por ello, este Trabajo Fin de Grado (TFG), se enfoca en el análisis y el desarrollo de un sistema de detección de blancos con baja sección radar equivalente (Radar Cross Section, RCS), como pueden ser los drones. El sistema de detección elegido está basado en radar pasivo que usa señales de radiodifusión de televisión, concretamente señales de radiodifusión de vídeo digital terrestre (Digital Video Broadcasting-Terrestrial, DVB-T) como iluminador de oportunidad (IO) [10].

Con este estudio, se pretende contribuir al avance en seguridad en el ámbito militar, abordando la creciente preocupación por el uso de drones en escenarios conflictivos.

## 1.2 Objetivos.

El objetivo principal de este TFG es analizar y demostrar la capacidad de detección de vehículos aéreos no tripulados con suficiente antelación y a una distancia adecuada, incluso cuando presentan una RCS reducida. Para ello, se empleará un sistema de radar pasivo basado en señales DVB-T, con el fin de evaluar su posible implementación como una herramienta de apoyo en combate en tiempo real.

Para alcanzar este objetivo principal, se han definido varios objetivos específicos, los cuales permitirán validar la viabilidad del sistema propuesto. Entre estos objetivos específicos cabe citar:

- **Análisis de la RCS de un dron mediante teoría de rayos:** a partir del modelo digital de un determinado dron, se analizará la RCS mínima en función de la frecuencia y de los ángulos de elevación y azimut, evaluando como la señal incide en un escenario de radar pasivo.
- **Optimización del escenario de radar pasivo:** se estudiará y determinará la mejor configuración del sistema que permita maximizar la probabilidad de detección del dron (es decir, maximizar la relación señal a ruido (Signal Noise Ratio, SNR) a partir de una RCS mínima, considerando factores como el ancho de banda de la señal utilizada, el tiempo de integración de datos y la posición del blanco dentro del escenario. Para ello, se partirá de ciertas funcionalidades desarrolladas en TFGs previos ([18] y [19]) y en el demostrador de radar pasivo desarrollado en Mirapamar [20].
- **Evaluación de la viabilidad del sistema:** se analizarán los resultados obtenidos con el propósito de recomendar la implementación del sistema a los organismos de seguridad militar.
- **Identificación de limitaciones y mejoras:** se identificarán aquellos aspectos que afectan a la eficacia del sistema, proponiendo posibles mejoras para su optimización.

Adicionalmente, como parte del desarrollo del trabajo, cabe destacar que es necesario adquirir cierta experiencia en el manejo de un dron DJI Mini 4, lo que resultará fundamental para la ejecución eficiente de las pruebas y experimentos, que permitan alcanzar los objetivos planteados.

## 1.3 Estructura del trabajo.

El trabajo se divide de la siguiente manera:

- **Introducción:** en este apartado se expone la motivación que ha impulsado la realización del trabajo, así como los objetivos a alcanzar.
- **Estado del arte:** consta de cuatro secciones en las que se abordan los siguientes temas:
  - a. Historia y evolución de los vehículos aéreos no tripulados.
  - b. Impacto de los conflictos militares, como el que tiene lugar entre Ucrania y Rusia, en el uso de drones, destacando la creciente importancia de su detección temprana.
  - c. Métodos actuales de detección de drones, justificando la idoneidad del empleo del radar pasivo.
  - d. Principales aplicaciones que tienen hoy en día los drones.
- **Radar pasivo:** en este apartado se comenta la evolución histórica del radar pasivo y se describen los principios básicos de funcionamiento. Además, se analizan las ecuaciones que describen los principales parámetros que determinan el rendimiento de detección de un sistema de radar

pasivo. También se describen los diferentes tipos de IO que permiten la detección pasiva y se introduce el proceso de detección en un escenario de tres dimensiones (3D).

- **Desarrollo del TFG:** en este capítulo se analizan los diversos factores que influyen directamente en la probabilidad de detección de un determinado dron, como es su RCS y la parametrización del radar. Además, se analizan resultados parciales obtenidos y se especifican los dispositivos empleados.
- **Resultados:** en este apartado se expone el análisis y la validación de los resultados obtenidos. En primer lugar, se evalúan los resultados obtenidos a partir de simulaciones con señales sintéticas basadas en señales pulsadas y en señales propias de DVB-T. En segundo lugar, se expondrán los resultados obtenidos a partir de detecciones reales.
- **Conclusiones y líneas futuras:** en este capítulo se exponen los principales hallazgos y conclusiones obtenidas y se realiza una propuesta de mejoras y líneas futuras de investigación que permitan aumentar la probabilidad de detección de drones principalmente dentro del ámbito de la Defensa.
- **Bibliografía:** en este apartado se enumeran las fuentes bibliográficas empleadas en este trabajo.
- **Anexos:** en los últimos apartados se añaden una serie de materiales complementarios. En primer lugar, se analizan las implicaciones sociales, ambientales y económicas y se realiza una reflexión ética y moral del trabajo. A continuación, se adjunta la explicación del funcionamiento del sistema de estimación de la RCS de un determinado blanco con la herramienta de Matlab Pofacets. Finalmente, se recogen los códigos de programación en Matlab desarrollados en el trabajo, así como todos los resultados intermedios obtenidos.

## 2 ESTADO DEL ARTE.

### 2.1 Los vehículos aéreos no tripulados.

El origen de los drones se remonta a la Primera Guerra Mundial (1914-1918), cuando se comenzaron a utilizar aeronaves pilotadas remotamente (Remotely Piloted Aircraft, RPA). Estos dispositivos, considerados los primeros “misiles crucero” fueron diseñados para ser armas de largo alcance. Sin embargo, su efectividad era limitada, ya que solo conseguían recorrer unos pocos cientos de metros debido a la influencia del viento y a la dificultad de calcular con precisión la distancia a un objeto en movimiento [21].

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), Gran Bretaña desarrolló los primeros blancos aéreos controlados por radio [22]. Uno de los avances más significativos de esta época fue el Queen bee, una versión del avión de madera De Havilland Tiger Moth (Figura 2-1).



Figura 2-1. Queen bee [22].

Al mismo tiempo, Estados Unidos y Alemania avanzaron en el desarrollo de sistemas similares, utilizándolos para el entrenamiento de las fuerzas de artillería y en la creación de misiles crucero. En esta etapa, se introdujo el primer motor a reacción en este tipo de aeronaves [23], sentando las bases para la evolución de los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV).

En la década de 1950, los drones dejaron de ser simples blancos aéreos y comenzaron a ser utilizados para interferir a los sistemas radar enemigos [24]. Su uso aumentó significativamente durante la Guerra Fría (1947-1991). En los años 60, se lograron mejoras claves, como mayor velocidad y alcance, además de la incorporación de cámaras de reconocimiento y la capacidad de portar bombas para ataques

terrestres. Un ejemplo de dron desarrollado en esta época y con estas características es el Tu-123 Yástreb, creado por los soviéticos (Figura 2-2) [25].



**Figura 2-2. Tu-123 Yástreb [25].**

En la década de los 80, el ejército israelí utilizó drones en el conflicto del Líbano, enfrentándose a las defensas antiaéreas sirias. En este periodo, ya contaban con sistemas GPS incorporados, lo que marcó un punto de inflexión en su desarrollo. A partir de este momento, Estados Unidos intensificó sus esfuerzos en la mejora de estas aeronaves, enfocándose en su uso para operaciones navales y lanzamientos desde buques [26]. Este avance permitió la introducción de drones pilotados a distancia.

Durante la década de los 90 se comenzaron a emplear los satélites, haciendo que el alcance dejara de estar limitado por la señal radio y los sistemas de navegación basados en giróscopos [27]. Fue en los años 2000 cuando se comenzaron a introducir misiles y bombas guiadas en estos dispositivos, lo que amplió significativamente su uso en conflictos como la guerra de Irak y las operaciones contra Al Qaeda en Pakistán ([21] y [28]).

En el siglo XXI, los avances tecnológicos han permitido mejorar aún más la autonomía, el alcance y las capacidades operativas de los drones. Un ejemplo de esto es el Predator B (Figura 2-3), equipado con un motor turbohélice, velocidad máxima de 405 km/h, un techo de vuelo de 15.240 metros, autonomía de 25 horas y un alcance aproximado de 3.000 kilómetros ([29] y [30]). Actualmente, el Ejército del Aire cuenta con estos drones en su flota.



**Figura 2-3. MQ-9 Predator B [31].**

Otro ejemplo destacado es el Global Hawk (Figura 2-4), un dron teledirigido equipado con un motor turbofán, lo que le permite alcanzar altitudes de vuelo más elevadas. Este sistema proporciona información prácticamente en tiempo real, gracias a la integración de sensores de inteligencia de imágenes, detección de señales e identificación de objetivos móviles.



Figura 2-4. RQ-4 Global Hawk [32].

Por otra parte, la utilización de drones de tamaño reducido ha aumentado significativamente, ya que permiten apoyar a tropas en tierra o realizar incursiones de manera sigilosa, obteniendo información de inteligencia clave para determinadas misiones. Sin embargo, este tipo de drones son los más difíciles de detectar, lo que motiva este trabajo, cuyo objetivo es analizar su detectabilidad y evaluar la eficacia de un radar pasivo para esta función específica.

En el ámbito civil, los UAV también se utilizan para la vigilancia de determinadas zonas o para la exploración de entornos de difícil acceso para el ser humano. La creciente demanda de estos dispositivos ha impulsado la creación de nuevas empresas especializadas, generando nuevas oportunidades de empleo. Por ello, si se emplean de manera adecuada, los drones pueden aportar grandes beneficios en múltiples sectores.

Actualmente, existen diversas clasificaciones que agrupan las plataformas aéreas utilizadas en los sistemas aéreos no tripulados en clases y categorías. Una de las de mayor interés dentro del ámbito militar es la clasificación en clases empleada por la OTAN, que puede observarse en la Tabla 2-1 [33]. En esta clasificación se incluye, además del peso del UAV, variables como la altura máxima de vuelo, o el alcance máximo.

Class	Category	Normal employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Primary Supported Commander	Example platform
CLASS I (less than 150 kg)	SMALL >20 KG	Tactical Unit (employs launch system)	Up to 5K ft AGL	50 km (LOS)	BN/Regt, BG	Hermes 90 Luna
	MINI 2-20 kg	Tactical Sub-unit (manual launch)	Up to 3K ft AGL	25 km (LOS)	Coy/Sqn	Aladin DH3 DRAC Eagle Raven Scan Skylark Strix T-Hawk
	MICRO <2 kg	Tactical PI, Sect, Individual (single operator)	Up to 200 ft AGL	5 km (LOS)	PI, Sect	Black Widow
CLASS II (150 kg to 600 kg)	TACTICAL	Tactical Formation	Up to 10,000 ft AGL	200 km (LOS)	Bde Comd	Aerostar Hermes 450 iView 250 Ranger Sperwer
CLASS III (more than 600 kg)	Strike/ Combat	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theater COM	
	HALE	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theater COM	Global Hawk
	MALE	Operational/theater	Up to 45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	JTF COM	Predator B Predator A Harfang Heron Heron TP Hermes 900

Table 1 - NATO UAS Classification Guide. September 2009 JCGUAV meeting

Tabla 2-1. Clasificación UAVs según la OTAN [33].

Los drones de tamaño reducido (aquellos que se pueden volar sin ningún tipo de licencia y cuyo peso es inferior a 249 gramos) se incluyen dentro de los dispositivos de clase I. Además, se clasifican como dispositivos que vuelan a baja altura, lentos y pequeños (Low, Slow and Small, LSS). Para los dispositivos de tamaño más reducido, es interesante comprender la diferencia entre las numerosas siglas empleadas para denominarlos. En la Figura 2-5 se presenta una explicación detallada de estas diferencias.

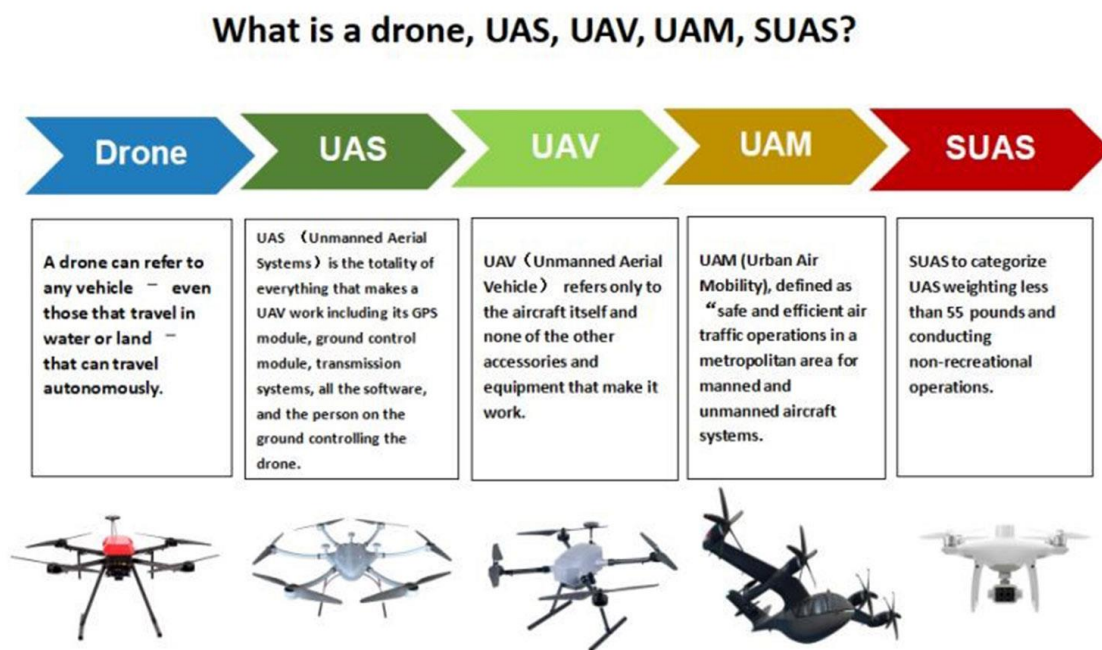


Figura 2-5. Diferencia entre dron, UAS, UAV, UAM y SUAS [34].

La principal diferencia entre las siglas escritas en la Figura 2-5 reside en los componentes que se tienen en cuenta cuando se nombra el dispositivo [34]. En primer lugar, un dron se refiere a cualquier vehículo que pueda moverse de forma autónoma, incluso los que se desplazan por tierra y agua. Posteriormente, los UAS tienen en cuenta el dispositivo completo, incluyendo componentes como GPS, sistemas de transmisión y software mientras que los UAV solo tienen en cuenta el propio objeto, no sus componentes adicionales que le hacen funcionar. Las siglas UAM (Urban Air Movility) no son muy empleadas ya que se refieren a las operaciones de tráfico seguras en zonas metropolitanas llevadas a cabo por estos dispositivos. Por último, los SUAS son un tipo de UAS que pesan menos de 25 kilogramos.

Además de las siglas UAV (Unmanned Aerial Vehicle), utilizadas comúnmente para referirse a los drones, también se emplea el término RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). Actualmente, las siglas UAV están comenzando a quedarse obsoletas, siendo reemplazadas por UAS (Unmanned Aircraft System). Dentro de los UAS se encuentran los RPAS (aeronave pilotada a distancia con enlace de mando y control según lo especificado para cada tipo por la Organización de Aviación Civil Internacional, OACI) y las aeronaves autónomas (no tripulada que no permite la intervención del piloto en la gestión del vuelo) [35].

La OTAN lleva años estudiando el uso de drones y desarrollando documentos con conclusiones derivadas de diferentes pruebas. Como ejemplo, sirvan las reuniones (“meetings”) de carácter científico titulados “Detection, Tracking, ID and Defeat of Small UAVs in Complex Environments” (STO-MP-

SET-315) [4] y “Drone detectability: modelling the relevant signature” (STO-MP-MSG-SET-183) [5]. En estos eventos se abordaron temas como la dificultad de la detección de drones de pequeño tamaño en distintos entornos, la creación y comparación de modelos de UAV en función de sus patrones de vuelo y posibles comportamientos anómalos, así como el estudio de la detección y seguimiento mediante radares multiestáticos o pasivos, entre otros.

### *2.1.1 Materiales empleados en micro drones.*

El material empleado en la construcción de estos dispositivos debe ser capaz de soportar los esfuerzos durante el vuelo, especialmente en las maniobras bruscas que provocan fuerzas mayores. Por ello, es fundamental evaluar tanto el desgaste como la fatiga de los componentes del UAV.

Debido al efecto escala, la frecuencia natural de un componente se incrementa a medida que se reduce su tamaño, lo que implica que el tiempo hasta su fallo será menor en las aeronaves no tripuladas de menor tamaño. Sin embargo, esta tendencia puede revertirse si se disminuyen las cargas y los esfuerzos a los que están sometidos los materiales [36].

Actualmente, los materiales compuestos están sustituyendo a las aleaciones ligeras debido a sus características inherentes, ya que permiten alcanzar una mayor durabilidad y un mayor número de horas de vuelo antes de requerir el reemplazo de piezas ([37] y [38]). Los elementos más críticos del dron son las alas y el estabilizador horizontal. El material más empleado suele ser la fibra de carbono, material cuya tensión máxima permitida es significativamente superior a las fuerzas ejercidas sobre el dron [39].

El proceso de diseño comienza buscando la funcionalidad óptima y, posteriormente, se seleccionan los materiales adecuados. Según la función del dron, los niveles de resistencia requeridos y el presupuesto disponible, pueden emplearse diferentes materiales ([36] y [40]):

- **Aluminio:** metal no ferromagnético con alta resistencia mecánica, fácil para el mecanizado, ligero y barato. Según la aleación, el aluminio puede llegar a resistir hasta 690 MPa. Suele emplearse en el soporte y apoyo del dron.
- **Fibra de carbono:** formada por filamentos de entre 5 y 10 micrómetros de diámetro. Cada uno de los filamentos está compuesto por miles de fibras de carbono. Posee una resistencia longitudinal cercana a los 1100 MPa y transversal de 50 MPa. Coste elevado. Material con conductividad eléctrica y aislamiento al calor elevado. Suele emplearse para la construcción de los brazos del dron debido a su resistencia frente a la fatiga.
- **Fibra de vidrio:** formada por numerosas y delgadas fibras. Precio muy reducido. Posee propiedades mecánicas similares al carbono, con una resistencia longitudinal de 1080 MPa y transversal de 50 MPa. En ocasiones se emplea plástico reforzado con este material.
- **Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS):** es un plástico resistente al impacto que también es empleado en la industria de la automoción y de forma doméstica. Posee características como rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza, resistencia a temperaturas y al impacto. Precio muy elevado.
- **Poliácido láctico (PLA):** polímero construido a partir de ácido láctico. Es un termoplástico obtenido a partir del almidón del maíz, de yuca o mandioca o caña de azúcar. Fácilmente degradable en agua y óxido de carbono. Es empleado en impresoras 3D y por esta razón, no posee un precio excesivamente elevado.

- Poliestireno: posee muy baja resistencia, 250 kPa. Gran aislante térmico y grosor considerable. Buen protector contra choques. Bajo peso. Material empleado en la tapa, por ser ligero, barato y aislar del calor.
- Materiales compuestos: formados por la unión de dos o más materiales para conseguir uno con mejores propiedades. Se suelen emplear este tipo de materiales para mejorar la resistencia y que el dron sea más ligero. Se consiguen insertando fibras de una sustancia en la matriz de otra. De esta forma, la fuerza de las fibras individuales puede aprovecharse al estar incrustadas en una matriz que actúa como adhesivo, uniendo los compuestos y dando solidez al material.

Las hélices suelen estar fabricadas en plástico (nylon o ABS) aunque a veces se emplean fibras de carbono. La diferencia principal entre estos materiales radica en el precio y en la resistencia: mientras que las hélices de plástico son más económicas, las de fibra de carbono ofrecen mayor durabilidad y rigidez. Es importante destacar que las hélices son una de las partes más sensibles del dron, ya que cualquier daño puede afectar su rendimiento y estabilidad en vuelo.

La elección del motor debe adecuarse al peso del dron, ya que influye directamente en el consumo de la batería y en la eficiencia del vuelo. Además, es fundamental conseguir una combinación óptima entre el motor, las hélices y la batería para garantizar un rendimiento equilibrado. Si el motor es demasiado potente, el dron será más ágil y rápido, pero su control se volverá más complejo. No obstante, es preferible contar con un exceso de potencia en lugar de una potencia insuficiente, ya que una falta de empuje podría impedir un manejo adecuado del dron y comprometer su estabilidad de vuelo.

## 2.2 Conflicto Ucrania-Rusia.

El conflicto ruso-ucraniano se intensificó a partir de la Declaración de Independencia de Ucrania en 1991, alcanzando un punto crítico el 24 de febrero de 2022, cuando tropas rusas, provenientes de Rusia y Bielorrusia, invadieron Ucrania cruzando su frontera [41].

Los diferentes mítines organizados por la OTAN revelan la creciente preocupación por el uso de drones con intenciones ofensivas, como se ha evidenciado en este conflicto. En particular, el mitin llevado a cabo en 2021 con título: “Drone Detectability: Modelling the Relevant Signature” (STO-MP-MSG-SET-183), abordó diferentes temas clave, desde el desarrollo de sistemas para detectar drones y simulaciones de objetos de pequeño tamaño, hasta la evaluación de diferentes tecnologías de detección, como sensores acústicos, sensores de radiofrecuencia o sistemas electroópticos e infrarrojos [5].

Durante esta fase del conflicto, ha habido un cambio significativo en las tácticas de ataque, con un uso de drones cada vez más frecuente para maximizar el impacto en el enemigo. Estas aeronaves ofrecen una gran ventaja operativa frente al despliegue de soldados o el empleo de otros métodos de ataque. Tanto Rusia como Ucrania han recurrido al uso de UAVs tanto para realizar ataques como para obtener información de inteligencia. No obstante, es importante considerar que, según la legislación internacional y tratados vigentes, existen límites que no deben ser sobrepasados en el uso de estas tecnologías [42]. Algunos beneficios que los drones proporcionan a ambas partes se pueden resumir en:

- La disminución de pérdidas humanas en combate: al ser controlados de manera remota, los drones permiten llevar a cabo misiones sin arriesgar vidas humanas directamente en el campo de batalla.

- Reducción del coste de los ataques: no es necesario utilizar dispositivos de alto coste para realizar incursiones en zonas enemigas y causar daños significativos, lo que hace que su uso sea más accesible y rentable.
- Mayor discreción; los drones, debido a su tamaño reducido y capacidad para sobrevolar áreas sin ser fácilmente detectados, ofrecen una mayor discreción en comparación con las tropas convencionales.

Por estas razones, entre otras, los drones están siendo cada vez más utilizados. Es por ello, que su detección temprana es crucial para proteger a las fuerzas propias de posibles ataques. Si bien se ha mencionado el uso no ético de esta tecnología, los drones también pueden tener aplicaciones positivas y beneficiosas, como en la protección de infraestructuras críticas y control de fronteras y, por supuesto, en la defensa nacional.

Uno de los drones aéreos más empleados en este conflicto son los drones Bayraktar TB2, utilizado por Ucrania y de fabricación turca. Una característica representativa que poseen es que pueden portar bombas guiadas por láser 4MAM-L y una actitud máxima de vuelo de 7.600 metros [3].



**Figura 2-6. Dron Byraktar TB2 [3].**

Debido a que los modelos militares más costosos, como el Byraktar TB2 (Figura 2-6), con un precio aproximado de 2 millones de dólares, son menos accesibles, ambas partes, pero especialmente Ucrania, están recurriendo a modelos comerciales pequeños como el DJI Mavic 3 (Figura 2-7). La mayor ventaja de este tipo de dron radica en su tamaño reducido, con una envergadura de 28,3 centímetros (ver Tabla 2-2) [3]. Existe un interés especial en la detección de este tipo de drones pequeños, ya que, como se puede observar, son empleados en conflictos armados actuales y tienen la capacidad de causar daños, de ahí que, su temprana detección se vuelve esencial. Llegados a este punto, es de interés avanzar que para la realización de este trabajo se utilizó un dron (DJI Mini 4 Pro) con unas características técnicas y de envergadura muy similares al dron DJI Mavic 3 usado en el conflicto ruso-ucraniano, aunque de menor peso (249 gramos del DJI Mini 4 Pro frente a los 958 gramos del DJI Mavic 3).



**Figura 2-7. Dron DJI Mavic 3 [3].**

Por otro lado, Rusia emplea principalmente dos tipos de drones. El Orlan-10 (Figura 2-8), cuando desean aprovechar su máximo alcance, que se extiende hasta 600 km, con una autonomía de hasta 18 horas, y el Shahed-136 (Figura 2-9) de elaboración iraní, el cual posee una envergadura de 2,5 metros y un alcance máximo de hasta 2.000 km y 4.000 metros de altura, dependiendo de la munición con la que esté cargado. Este último suele ser empleado para ataques a largas distancias, lo que dificulta su detección (Tabla 2-2) ([43] y [44]).



**Figura 2-8. Dron Orlan-10 [43].**



**Figura 2-9. Dron Shahed-136 [44].**

En la Tabla 2-2 se puede observar una comparación de las principales características de cada tipo de dron anteriormente mencionado.

<b>Dron</b>	<b>Altitud máxima (m)</b>	<b>Alcance máximo (km)</b>	<b>Velocidad máxima (km/h)</b>	<b>Envergadura (m)</b>
<b>Bayraktar TB2 [3]</b>	7600	300	220	12
<b>DJI Mavic 3 [3]</b>	6000	30	68,4	0,283
<b>Orlan-10 [43]</b>	5000	600	150	3,1
<b>Shahed-136 [44]</b>	4000	2000	185	2,5

Tabla 2-2. Características drones en el conflicto ruso-ucraniano.

### 2.3 Métodos de detección de drones.

La detección de drones es un proceso esencial para identificar y rastrear vehículos aéreos no tripulados (UAV) que puedan representar riesgos para la seguridad, privacidad o infraestructura crítica. A medida que los drones se vuelven más comunes y accesibles, tanto para usos recreativos como comerciales, las soluciones para detectarlos han evolucionado significativamente. Existen varias tecnologías y métodos para llevar a cabo esta detección con una serie de ventajas y desventajas que se analizan a continuación. Entre las diferentes propuestas que tienen en cuenta diversos factores que influyen en la detectabilidad de un dron, cabe destacar las presentadas en la reunión científica de la OTAN llevado a cabo en 2021 y titulada “Drone Detectability: Modelling the Relevant Signature” [5]. Asimismo, se expone la eficacia de algunos de los métodos que se encuentran expuestos a continuación.

#### 1. Detección de radiofrecuencia (RF).

Los drones suelen comunicarse con sus controladores a través de señales de radiofrecuencia (RF). Los detectores de RF monitorean el espectro de frecuencias comúnmente usadas por drones para identificar su presencia. Esto puede ayudar a estimar las capacidades de los transmisores de los UAVs sin ser detectados. Analizando la señal de RF, se pueden monitorear, detectar y clasificar las señales inalámbricas emitidas por los drones, lo que permite obtener información sobre los transmisores, como puede ser la estimación de la dirección de procedencia de la señal radio [7].

La clasificación de la señal RF se basa en el reconocimiento del esquema de modulación, lo que permite extraer información útil. Una vez obtenida la modulación, se puede proceder a su demodulación, decodificación y extracción de los paquetes de datos, lo que permite precisar el modelo empleado.

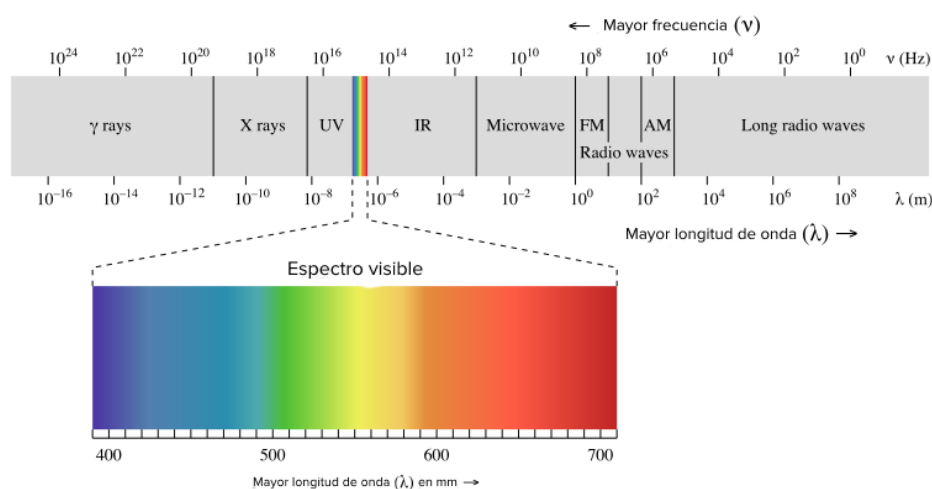
Incluso se puede evaluar el rendimiento, en un entorno real, utilizando herramientas como Radio Frequency Signal Classification (RFClass), la cual realiza los diferentes pasos explicados anteriormente. Incluso después de decodificar y extraer los datos, esta herramienta puede crear un paquete malicioso e inyectarlo en el entorno de comunicación del adversario, con el objetivo de llevar a cabo operaciones ofensivas. El resultado obtenido puede ser la correcta detección de la señal del dron en diferentes condiciones de relación señal a ruido (Signal Noise Ratio, SNR).

La principal ventaja de este medio de detección radica en el funcionamiento bajo cualquier condición climática incluso sin visibilidad. De esta forma, puede identificar el tipo de dron o ubicación del piloto.

Sin embargo, debido a que la detección se basa en el análisis del espectro de frecuencias, no es capaz de detectar drones que operan de manera autónoma sin comunicación activa con un controlador, lo que representa una carencia significativa en la detección.

## 2. Cámaras ópticas y térmicas.

Las cámaras ópticas y térmicas pueden identificar drones a través de imágenes. Las cámaras ópticas utilizan video en tiempo real, mientras que las térmicas detectan el calor generado por el contacto. Las cámaras ópticas emplean la porción del espectro electromagnético visible. El ojo humano es capaz de observar frecuencias entre 400 y 790 THz o longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros, aproximadamente. En la Figura 2-10 se puede observar una representación gráfica del espectro electromagnético, indicando el ancho de frecuencias del espectro visible [8].



1

**Figura 2-10. Espectro electromagnético [8].**

Por otro lado, las cámaras térmicas utilizan la radiación térmica emitida por los objetos por el simple hecho de encontrarse por encima de los  $0^\circ$  Kelvin. Esta radiación será mejor captada cuanto mayor sea la temperatura del elemento que se está observando. Cabe destacar que las cámaras térmicas pueden captar radiación en cualquier momento del día, independientemente de la iluminación disponible, lo que las hace útiles como una forma de visión nocturna.

En la Figura 2-10 se puede observar que la radiación infrarroja (IR) se encuentra a longitudes de onda mayores que la radiación visible, expandiéndose desde los 700 nanómetros hasta 1 milímetro aproximadamente.

En [9] se lleva a cabo un estudio de estos dos tipos de sensores, desde la captación y formación de imágenes hasta la aplicación de modelos para la predicción de detección, reconocimiento e identificación de contactos. También se abordan temas como la radiometría y formación de imágenes para un análisis posterior. El grupo de tarea de investigación de la OTAN SET-260 llevó a cabo, en junio de 2019, un ensayo para recopilar las firmas electroópticas e infrarrojas (EO/IR) de UAVs en diferentes bandas. Se desarrolló en CENZUB, centro de entrenamiento para combate urbano de las fuerzas armadas francesas. Como conclusión, se exponen las ventajas y desventajas de detectar UAVs en las diferentes bandas EO/IR [45].

La principal ventaja de este tipo de detección es que, además de determinar la existencia de un dron, permite una confirmación visual de la presencia del mismo. Con otros métodos de detección, puede existir cierta incertidumbre, como posibles falsas alarmas o detecciones similares, lo que puede llevar a interpretaciones erróneas. A pesar de esta gran ventaja, también presenta una serie de desventajas. Por un lado, su efectividad puede verse afectada por factores como el clima, iluminación y obstáculos físicos, lo que puede impedir la detección en ciertas condiciones. Y tal vez, como limitación más importante cabe destacar el estrecho campo de visión (Field of View, FoV) y la relativa escasa distancia de detección que este tipo de sensores suelen disponer.

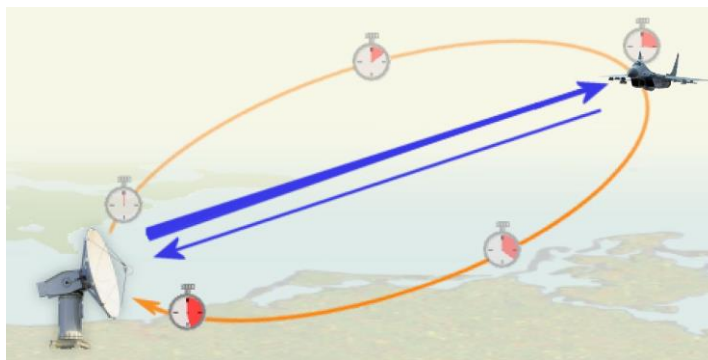
### 3. Radar.

El radar es una tecnología clásica de detección que puede identificar drones mediante el reflejo de ondas electromagnéticas en el objeto en vuelo. Dependiendo del tipo de radar, se puede detectar la presencia de un blanco, la distancia a él, su posición angular y el movimiento relativo respecto al radar [10]. Existen diferentes criterios básicos de clasificación de los sistemas radar [46]:

- Según la ubicación del receptor: monoestáticos, transmisor y receptor en el mismo lugar; biestáticos, en diferentes lugares y multiestáticos, los cuales combinan la información recibida por receptores en varias localizaciones.
- Según la forma de onda: de onda pulsada, que transmite periódicamente un pulso y de onda continua (Continuous Wave, CW), transmitiendo ininterrumpidamente. En ambos casos, la señal puede estar modulada.
- Según la presencia o no de transmisor propio: constituye una de las clasificaciones que posee más importancia. Aquí se encontrarán los radares activos, con su propio transmisor sincronizado con el receptor y los radares pasivos, sin transmisor, los cuales emplean un iluminador de oportunidad, como pueden ser las señales emitidas por los transmisores de televisión cercanas al receptor, entre otros.

Con este tipo de dispositivos, es crucial tener en cuenta muchos factores para una correcta detección de blancos, ya que existen diversas condiciones que influyen tanto positiva como negativamente, dependiendo de la situación. Algunos de los factores más importantes a tener en cuenta son las condiciones meteorológicas (lo que obliga a adaptar los filtros del radar según la situación), la distancia mínima de detección, y la capacidad de discriminación en términos de demora, distancia y velocidad del radar, además de la reflectividad del blanco.

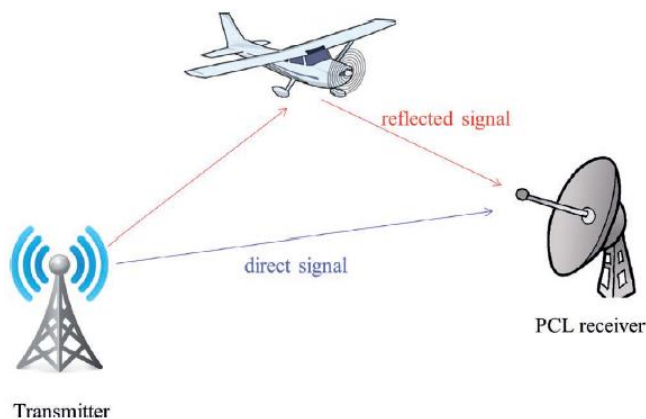
Según la frecuencia de trabajo del radar y su ancho de banda, la capacidad de detección de pequeños contactos puede variar. Por este motivo, ciertos radares serán más efectivos en la detección de objetos de menor tamaño y reflectividad que otros. En la Figura 2-11 se muestra una representación típica de un radar activo para la detección de blancos aéreos. En grandes rasgos, se trasmite una señal radioeléctrica y se mide el tiempo en que esa señal alcanza el blanco y regresa al radar.



**Figura 2-11. Funcionamiento radar activo [47].**

En el caso de los radares pasivos, es importante tener en cuenta que no emiten sus propias señales electromagnéticas, sino que se apoyan en las señales emitidas por un tercero conocido como IO. De esta manera, el radar pasivo conformará un sistema con baja probabilidad de ser interceptado (Low Probability of Intercept, LPI), lo que lo hace de especial interés dentro del ámbito militar. Este sistema capta tanto la señal que se refleja en el objeto a detectar como la señal directa proveniente del IO, como puede comprobarse en la Figura 2-12.

A groso modo, calculando la diferencia de tiempo entre la recepción de la señal directa y la señal reflejada se puede hacer una estimación de la llamada distancia biestática a la que se encuentra el blanco. En el siguiente capítulo del trabajo se analizará en profundidad el funcionamiento del radar pasivo, ya que es el método de detección seleccionado, debido a que es el que mejor se adapta a un escenario adverso y no controlado.



**Figura 2-12. Esquema de la geometría PCL [48].**

Este método de detección es eficaz en cualquier condición climática. Además, su alcance de detección es muy elevado, lo que le permite realizar un seguimiento del blanco en tiempo real. Otra ventaja significativa es que es menos vulnerable a interferencias de otros sistemas de detección. Además, la probabilidad de detección de este sistema por parte de los propios drones es muy baja, sobre todo si se trata de radares pasivos, ya que no emiten ondas electromagnéticas. Sin embargo, los drones pequeños (RCS pequeña) o que vuelen a baja velocidad pueden ser difíciles de detectar, ya que algunos radares se encuentran optimizados con diferentes parámetros para aeronaves más grandes.

#### 4. Detección acústica.

Los drones generan un ruido característico debido a sus motores y hélices, lo que puede ser captado por sensores acústicos y obtener su posición espacial ([12] y [13]). Las ondas sonoras se producen debido a la vibración de un objeto y pueden propagarse a través de diferentes medios, como el aire, agua o sólidos. Las emisiones acústicas generadas por los drones son características de cada tipo de propulsión, por lo que se podría llegar a clasificar el tipo de dron que se está detectando simplemente por su firma acústica. Estas emisiones acústicas provocan variaciones en el entorno acústico circundante. En el documento sobre la detección de drones elaborado por la OTAN [49], se investiga el uso de una red de sensores de audio que emplean un algoritmo de tres fases. Este algoritmo se utiliza para detectar la presencia de energía acústica en el entorno monitorizado, reconocer la firma acústica de un dron específico y colaborar con un enfoque de múltiples nodos para seguir al dron.

Sin embargo, en este tipo de detección se deben tener en cuenta las pérdidas de señal existentes debido a la distancia entre el receptor acústico y el emisor, el propio dron, así como las pérdidas adicionales derivadas de factores como el clima o el nivel de ruido en áreas urbanas, que podrían superar el valor mínimo de la relación señal a ruido requerido para una medición eficaz [12]. Para analizar la señal sonora se pueden observar varios aspectos, por ejemplo, en el dominio del tiempo, donde se puede observar si se trata de una señal estacionaria o no, ya que el tiempo que tarda en llegar la señal al receptor varía o en el dominio de la frecuencia, para observar si se trata de una señal de banda ancha, debido a los rotores del empuje del dron [13].

La detección acústica es especialmente eficaz a corta distancia y en entornos donde el ruido ambiental es bajo. Por esta razón, en situaciones de conflicto armado o en áreas muy pobladas en las que el ruido es elevado, este tipo de detección no será el más adecuado; sobre todo si se trata de detectar dispositivos de un tamaño tan reducido como los minidrones. Además, su rango de detección es limitado.

#### 5. Light Detection and Ranging.

Los sistemas Light Detection and Ranging (LIDAR) son sistemas que utilizan pulsos de láser infrarrojos para medir la distancia y detectar objetos en su entorno en tres dimensiones (3D) ([14], [15] y [16]). Aunque no es tan común, en los últimos años ha habido un cierto avance a la hora de su uso en la detección de drones. Existen tres tipos de sensores: aerotransportado, empleado desde un helicóptero, avión o dron; terrestre, pudiendo ser móviles al estar instalados en vehículos y acuáticos, los cuales recopilan tanto la profundidad como la elevación del agua.

Según el medio en el que se empleen estarán dotados de unos elementos u otros, pero todos poseen tres en común. El escáner láser que mide distancias y ángulo, sistemas de navegación y posicionamiento como el Global Positioning System (GPS) y el sistema inercial como el Inertial Navigation System (INS), dando a conocer la posición del elemento de medición y corroborando los datos obtenidos. El tercer componente es la tecnología informativa, la cual procesa los datos obtenidos para, posteriormente, poder analizarlos.

El funcionamiento de este tipo de sistemas es sencillo, el objeto emite miles de rayos láser por segundo que rebotan en los contactos a detectar. Se crea una “nube de puntos” que emplea la información de los sistemas de posicionamiento mencionados anteriormente y genera un mapa de puntos tridimensionales reales. Se realiza una medición del tiempo que tarda en regresar el láser y conociendo la velocidad de la luz, se determina la distancia a la que se encuentra el objeto.

Estos sistemas pueden ser clasificados mediante dos criterios:

- Según el tipo de láser. Se puede encontrar un *sensor de pulsos*, en el que se mide el tiempo que el pulso tarda en volver y, conociendo el valor de la velocidad de la luz, se obtiene la distancia a la que se encuentra el contacto. O *el sensor LIDAR* de medición de fase, que mide la diferencia de fase entre las señales emitidas y reflejadas y determina el número de longitud de ondas enteras recorridas.
- Según la forma de escaneado, se puede clasificar en cuatro tipos diferentes. En *modo de líneas*, realizando el escaneado recto, y *en modo zigzag*. Empleando, en ambos casos, un espejo rotatorio orientado de forma diferente para lograr la trayectoria deseada del rayo. En *modo de fibra óptica*, desviando el láser desde un cable de fibra óptica, obteniendo un escaneado en forma de circunferencia. Por último, *de forma elíptica*, realizando un desvío del haz a través de dos espejos.

La precisión de este tipo de detección en la identificación de objetos es elevada. Además, crea modelos en tres dimensiones sin necesidad de interacción con un ser humano, considerándose estas dos características unas claras ventajas. Por el contrario, es un sistema que se encuentra en desarrollo para la aplicación en la detección de drones y su precio puede ser elevado.

#### 6. Sistemas de fusión de sensores.

Muchas soluciones modernas combinan múltiples tecnologías (RF, radar, cámaras) para ofrecer una mayor precisión y reducir las falsas alarmas [50].

El Sistema Multimodal de Exposición de Trayectorias 3D de Vehículos Aéreos no Tripulados (Multimodal Unmanned Aerial Vehicles 3D Trajectory Display System, MUTES) es un sistema que integra varios módulos de sensores, incluyendo micrófonos, una cámara y un LIDAR. Cada sensor proporciona un tipo de información. Los micrófonos proporcionan una estimación de la fuente de sonido con una buena relación señal a ruido (SNR). El LIDAR y la cámara indican la localización precisa. Los micrófonos poseen un alcance, en ángulo, mayor que los otros dos sistemas, pero menor exactitud, por lo que las carencias de precisión de éstos se solucionan con el LIDAR y la cámara, y viceversa, estos últimos tienen un campo de visión más estrecho pero muy definido.

Este sistema comienza con una detección más general para después centrarse y realizar un seguimiento en 3D preciso. Además, incorpora un modelo de eliminación de ruido ambiental que aísla de forma eficaz los ruidos característicos pertenecientes a un dron, mejorando las limitaciones que un detector tradicional posee con respecto al nivel de ruido existente [17].

El hecho de incluir más de un sensor en un mismo dispositivo suele incrementar el coste del mismo (tanto en su instalación como mantenimiento), por lo que a la vez que proporciona muchas ventajas con respecto a un sensor individual, es necesario encontrar un punto intermedio en el que haya balance entre el coste económico y las ventajas de cada opción, según las necesidades del usuario. Debe tenerse en cuenta la mejora en la fiabilidad debido al uso de diferentes sensores.

#### 2.3.1 Comparación.

En este apartado se encuentra la comparación de todos los medios de detección desarrollados anteriormente, detallando sus ventajas e inconvenientes (Tabla 2-3). Se toma la decisión de que, en base a sus ventajas y los medios disponibles para el desarrollo del presente trabajo, el empleo del radar pasivo es la mejor opción.

<b>Método de detección</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Radiofrecuencia (RF)</b>	Funciona sin importar la visibilidad o las condiciones climáticas, y puede identificar el tipo de dron o la ubicación del piloto.	No detecta drones que operan de manera autónoma sin comunicación activa con un controlador.
<b>Cámaras ópticas y térmicas</b>	Ofrecen una confirmación visual de la presencia del dron.	Pueden verse afectadas por el clima, la iluminación y obstáculos físicos. Estrecho campo de visión.
<b>Radar</b>	Puede detectar drones a largas distancias y es eficaz en todas las condiciones climáticas.	Los drones pequeños o volando a baja velocidad pueden ser difíciles de detectar, ya que algunos radares están optimizados para aeronaves más grandes.
<b>Detección acústica</b>	Eficaz a corta distancia y en entornos donde el ruido ambiental es bajo.	El rango de detección es limitado y puede ser ineficaz en áreas ruidosas.
<b>LIDAR (Light Detection and Ranging)</b>	Alta precisión en la identificación de objetos. Creación de modelos en tres dimensiones sin necesidad de interacción con un ser humano.	Aún en desarrollo para aplicaciones de detección de drones y puede ser costoso.
<b>Sistemas de fusión de sensores</b>	Mejora la fiabilidad al usar diferentes tipos de sensores.	Puede ser más costoso e implicar una mayor complejidad en la instalación y mantenimiento.

**Tabla 2-3. Ventajas y desventajas de los medios de detección.**

### *2.3.2 Conclusiones.*

Como se puede observar en la Tabla 2-3, cada sistema de detección tiene sus ventajas y desventajas. Si se pudiera realizar una combinación de estos medios, sería la opción indicada para beneficiarse de las ventajas de cada uno. Al no poseer esta alternativa con los medios que se disponen, el empleo del radar pasivo en este proyecto será el más indicado debido a las siguientes razones:

A diferencia de un radar activo, los radares pasivos poseen un bajo nivel de posibilidad de detección ya que no emiten ondas por sí mismos; puesto que su función es detectar el blanco a partir del eco emitido por otro transmisor, en nuestro caso, las antenas de televisión. Por esta misma razón, posee una menor probabilidad de sufrir interferencias ya que es más difícil que sea detectado y atacado con contramedidas electrónicas o jamming.

Según la infraestructura de señales presentes en el área de operación del radar pasivo, la cobertura de este puede llegar a ser muy elevada, aprovechando diferentes bandas de frecuencia.

Además, los drones más modernos no suelen emitir señales específicas que permitan clasificarlos ni estar dotados de un sistema de respuesta (transpondedor); por lo que el empleo de este tipo de radar es esencial para la detección de estos objetos sin necesidad de cooperación del objetivo (o del enemigo en ciertos casos).

## 2.4 Aplicaciones de los drones.

La detección temprana de drones puede tener muchas utilidades importantes en diferentes aspectos, tanto en la vida civil como militar [51]. A continuación, se describen algunas de ellas:

- Seguridad aeroportuaria: El empleo de drones permite monitorizar de forma rápida y eficiente, disminuyendo los tiempos de respuesta y previendo incidentes, detectando amenazas perimetrales y obstáculos en las pistas, además de evitar colisiones entre drones y aviones [52].
- Protección de instalaciones críticas: Se defiende infraestructuras clave como plantas nucleares, prisiones o bases militares. Sobrevolar este tipo de establecimientos delicados, tanto para la salud como para la seguridad de los ciudadanos, entre otras razones, garantiza mejores resultados y poder evitar accidentes debido a la temprana detección. Además, la seguridad de lugares penitenciarios o bases militares se ve aumentada debido a la gran calidad que poseen las cámaras instaladas en estos dispositivos y es, por esta razón, por la que cada vez se emplean más.
- Control de fronteras: Monitorea drones que puedan usarse para contrabando o vigilancia ilegal. El empleo en instalaciones portuarias es muy elevado ya que aumenta significativamente la seguridad en estas zonas, siendo de especial interés para la seguridad nacional. Estados Unidos ya es uno de los países que utiliza esta tecnología para proteger sus fronteras de posibles ataques o acciones ilegales. La implementación de drones para mejorar el control está aumentando y cada vez es más común [53].
- Eventos públicos: Garantiza la seguridad en grandes concentraciones de personas pudiendo detectar, por ejemplo, quien lanzó un objeto a los protagonistas de un concierto o en un evento deportivo. En este caso, se debe tener especial precaución al manejo del dron debido a la elevada densidad de personas presentes, aunque suelen estar dotados de sensores de anticolidión de forma que realizan maniobras automáticas de evasión impidiendo así la colisión. Además, existen otros factores añadidos a tener en cuenta según la situación en la que se vuela el dron [54].

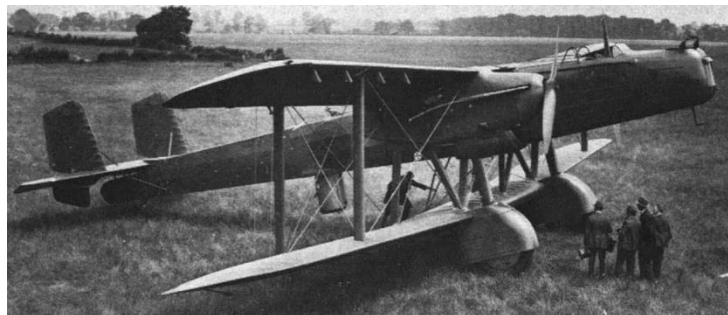
La detección de drones es una tecnología en constante desarrollo, impulsada por la creciente necesidad de gestionar el incremento de su presencia en el espacio aéreo. Se prevé que continúe avanzando conforme estos dispositivos se vuelvan aún más omnipresentes.

## 3 RADAR PASIVO.

### 3.1 Evolución del radar pasivo a lo largo de la historia.

El radar pasivo, que permite la localización de un blanco mediante mediciones de radar sin utilizar emisiones propias controladas, ha sido discutido, probado, reinventado y perfeccionado a lo largo de las últimas décadas [48]. Sus ventajas, como la operación encubierta y la reducción de costes al no requerir de un transmisor, son evidentes. Los intereses tanto civiles como militares, junto con los avances tecnológicos han impulsado de nuevo la investigación en la tecnología de radar pasivo.

El primer experimento sobre radar pasivo data de 1935, cuando Robert Watson Watt condujo el experimento Daventry con el propósito de detectar contactos aéreos. El experimento de Watson consistió en la utilización de la señal emitida por el transmisor de la British Broadcasting Corporation (BBC) en onda corta (5.9-6.2 MHz) para detectar el bombardero Heyford (Figura 3-1) a corta distancia, en este caso a unos 8 kilómetros.



**Figura 3-1. Bombardero Heyford [55].**

A raíz de este experimento y durante la Segunda Guerra Mundial, se instalaron una cadena de radares a lo largo de la costa sur y este de Inglaterra, orientados al continente. Este sistema, conocido como Chain Home, consistía en radares, en este caso activos, que operaban en frecuencias entre 20 y 30 MHz. A su vez, en el lado alemán, se desplegaron radares pasivos a lo largo del Canal de la Mancha, que aprovechaban las emisiones de los radares británicos para detectar la llegada de aeronaves aliadas. Estos sistemas son considerados como los primeros radares pasivos operacionales. Su principal ventaja fue la resistencia a los “British jammers”, dispositivos electrónicos diseñados para interferir con señales radio, como las empleadas en comunicaciones o GPS, lo que se denomina jamming. Dado que los alemanes utilizaban las emisiones británicas para la detección, no generaban sus propias señales, lo que significaba que no podían interferirse a sí mismos. Como resultado, sus sistemas de radar pasivo eran inmunes a los

intentos de interferencia británicos, lo que les proporcionaba una ventaja estratégica en la detección de aeronaves enemigas.

Después de permanecer en un segundo plano un par de décadas, un simposio de la OTAN sobre radar pasivo y ruido en el año 2016 despertó de nuevo el interés de la comunidad internacional en esta tecnología [56]. En dicho evento, además de destacar su carácter discreto y dificultad para ser detectado, se resaltó su capacidad inherente para contrarrestar la tecnología de baja detectabilidad (stealth technology) que se estaba desarrollando en las aeronaves en ese momento. La tecnología de baja detectabilidad, que tiene como objetivo principal la reducción de la RCS de las aeronaves, para minimizar la reflexión de las ondas electromagnéticas, fue concebida para evadir radares activos monoestáticos que operan a frecuencias relativamente altas, entre 1.2 GHz (banda L) y 9.4 GHz (banda X). Sin embargo, los radares pasivos, al operar en frecuencias menores, como VHF o UHF, demostraron ser una alternativa eficaz para contrarrestar esta tecnología de baja detectabilidad.

Como avance en este nuevo resurgir de la tecnología de radar pasivo, se comenzaron a utilizar las señales de televisión, señales analógicas en ese momento, como iluminador de oportunidad para detectar los contactos aéreos [57]. Con la evolución del sector, en algunos casos, se ha añadido la modulación en frecuencia para mejorar la detección. En los últimos años, la digitalización de las señales de radio y televisión, junto a la implementación del radar definido por software, han permitido que el radar pasivo sea empleado con mayor eficacia tanto en propósitos de seguridad militar como en aplicaciones civiles [58].

En el ámbito nacional, Indra desarrolló en 2013 un sistema de radar pasivo junto con inteligencia artificial (IA), siendo este uno de los más avanzados a nivel internacional. Además, actualmente muchas empresas están centrando sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos radares pasivos, como Airbus, Israel Aerospace Industries (IAI) y GNSS (empleando el sistema satelital Galileo), entre otros [10].

Al igual que se mencionaron anteriormente mítines de la OTAN relacionados con la preocupación por la detección de los drones, entre otros temas, existen documentos de 2017 y 2018 que tratan diferentes aspectos del localizador coherente pasivo (PCL), cubriendo desde su historia y fundamentos hasta su uso en plataformas móviles y diversas aplicaciones [6]. El PCL puede emplearse para automatizar sistemas de radar y procesamiento de señales, entre otras funciones. Por lo que ayudan al análisis de datos para la determinación y clasificación de contactos.

### **3.2 Principio de operación del radar pasivo.**

El radar pasivo es un tipo de sistema biestático que no transmite una señal electromagnética propia, sino que explota las señales emitidas por otras fuentes con otros propósitos, fuentes conocidas como IO. El principio de funcionamiento del radar pasivo, como se verá en esta sección, se basa en la medición del retardo temporal que sufre la señal recibida directamente del IO y la señal reflejada en un posible blanco a detectar a través de una simple correlación de señales. Como característica principal a tener en cuenta en un escenario de radar pasivo, en el receptor debe haber al menos una antena apuntando directamente al IO para captar la señal directa (lo que se conoce como señal de referencia) y otra antena apuntando al área de interés donde se esperan detectar los posibles blancos para captar la señal reflejada (lo que se conoce como señal de vigilancia).

#### *3.2.1 Descripción del escenario.*

A continuación, se realizará la descripción de los principales parámetros característicos de un escenario pasivo como son la distancia biestática, el tiempo de llegada de las señales, la frecuencia de

llegada de las señales, el mapa rango-Doppler o la SNR mínima necesaria en la recepción para maximizar la probabilidad de que un blanco sea detectado.

### 3.2.1.1 Distancia biestática y diferencia de tiempo de llegada (TDOA).

La distancia biestática en un radar pasivo se define como la diferencia entre la suma de las distancias desde el IO al blanco y desde el blanco al receptor radar, menos la distancia directa entre el IO y el receptor radar. Las diferentes distancias se encuentran representadas en la Figura 3-2. Además, existe una ecuación básica ( 3-1 ) con la que se calcula dicha distancia.

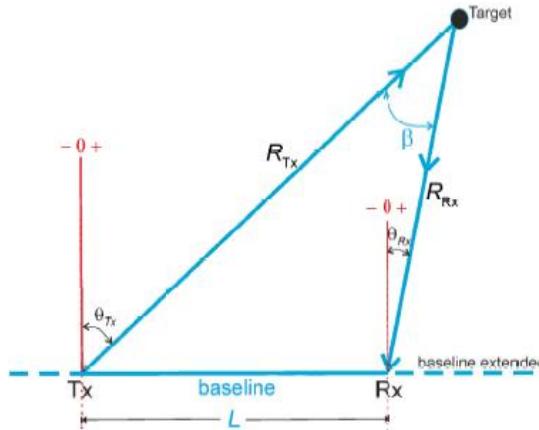


Figura 3-2. Distancias representativas radar biestático [59].

$$R_{\text{Biestática}} = R_{\text{Tx}} + R_{\text{Rx}} - L \quad (3-1)$$

siendo:

- $R_{\text{Biestática}}$ : distancia biestática del contacto.
- $R_{\text{Tx}}$ : distancia IO-contacto.
- $R_{\text{Rx}}$ : distancia contacto-receptor.
- $L$ : distancia IO-receptor o Línea Base.

Esta medida es fundamental en sistemas biestáticos, ya que permite calcular la posición de un blanco a partir del tiempo de llegada (Time Difference of Arrival, TDOA) de la señal directa y la reflejada. A partir de las diferentes distancias mostradas en la Figura 3-2, el valor del TDOA se obtiene como:

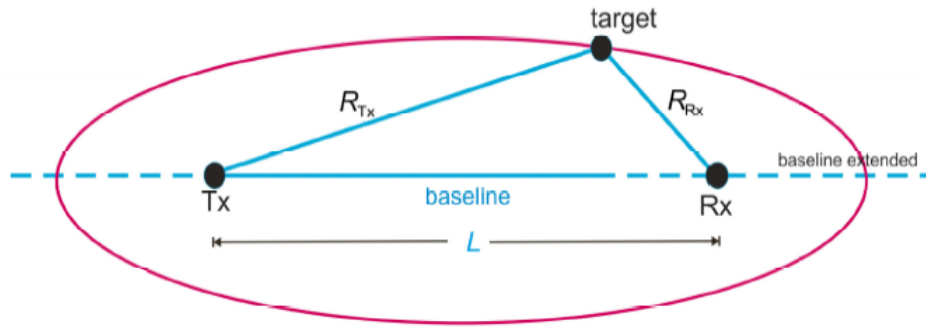
$$T_{\text{eco,Directo}} = \frac{L}{c} \quad T_{\text{eco,Reflejado}} = \frac{R_{\text{Tx}} + R_{\text{Rx}}}{c} \quad (3-2)$$

$$TDOA = T_{\text{eco,Reflejado}} - T_{\text{eco,Directo}} \quad (3-3)$$

$$TDOA = \frac{R_{\text{Tx}} + R_{\text{Rx}} - L}{c} \quad (3-4)$$

La diferencia del tiempo de llegada de las señales al receptor ( $T_{\text{eco,Reflejado}} - T_{\text{eco,Directo}}$ ) es el valor del TDOA. Relacionando las ecuaciones ( 3-2 ) y ( 3-3 ), se obtiene la ecuación ( 3-4 ), la cual representa la diferencia de tiempos en función de las diferentes distancias y la velocidad de propagación ( $c$ ).

En un escenario biestático como sucede con un sistema de radar pasivo, la distancia biestática define un elipsoide de rango constante, lo que significa que todos los posibles contactos que generan la misma distancia biestática se encuentran en la misma superficie del elipsoide. En el caso bidimensional (2D), cuando el blanco, el IO y el radar están en el mismo plano, el elipsoide se reduce a una elipse (Figura 3-3). Los focos de esta elipse son justamente las posiciones del IO y del receptor radar, donde además la Línea Base (L) es justamente la distancia entre los focos.



**Figura 3-3. Elipse con focos en Tx y Rx [59].**

Para determinar la posición exacta del blanco sobre la superficie del elipsoide o sobre la línea de la elipse existen diversos métodos que permiten eliminar esta incertidumbre. Por un lado, se pueden usar múltiples IO, de tal forma que cada uno de ellos generaría su correspondiente elipse interseccionándose en la posición del blanco [48]. Por otro lado, a partir de un único IO, se puede determinar el ángulo de llegada de la señal (Direction of Arrival, DoA) por diferentes técnicas como puede ser el beamforming disponiendo de más de una antena receptora.

Para determinar la distancia biestática máxima a la que se encuentra un blanco, más todavía en el caso de blancos de tamaño reducido como pueden ser los drones, es de interés plantear la ecuación de alcance máximo biestático. La ecuación que determina el alcance máximo del radar biestático, en unidades naturales, viene dada por [60]:

$$R_{max}^4 = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot l \cdot (k \cdot T \cdot B \cdot F) \cdot SNR_{minDET}} \cdot \sigma \quad (3-5)$$

siendo:

- $P_{tx}$ : potencia transmitida (W).
- $G_t$ : ganancia del transmisor (adimensional).
- $G_r$ : ganancia del receptor (adimensional).
- $\lambda$ : longitud de onda (m).
- $\sigma$ : RCS del blanco ( $m^2$ ).
- $l$ : pérdidas en los cables o elementos de RF, propagación, hidrometeoros... (adimensional)
- $k$ : constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K).
- $T$ : temperatura equivalente de ruido ( $^{\circ}K$ ).
- Suele emplearse la simplificación  $k \cdot T = 4 \cdot 10^{-21}$  W/Hz.
- $B$ : ancho de banda del sistema, dependerá de la señal transmitida (Hz).
- $F = \frac{SNR_{in\ RX}}{SNR_{out\ RX}}$ : figura de ruido o figura de mérito del receptor (adimensional).

- $P_n = k \cdot T \cdot B$ : potencia de ruido [W].
- $SNR_{minDET}$ : relación señal a ruido mínima necesaria para la detección (adimensional).

Parte de este TFG se basará en analizar los diferentes parámetros de la ecuación ( 3-5 ) que nos permitan maximizar la ecuación de alcance radar biestático para la detección de drones en función de su RCS. Es decir, para un dron que refleja una determinada potencia de la señal incidente, cuanto de lejos del receptor radar podrá estar el blanco para disponer de una SNR mínima suficiente para una determinada probabilidad de detección.

### 3.2.1.2 Diferencia de frecuencia de llegada (FDOA).

La diferencia de frecuencia de llegada (Frequency Difference of Arrival, FDOA) en un sistema de radar pasivo se basa en la variación de frecuencia Doppler en el receptor entre la señal emitida por el IO y la señal reflejada por el blanco. En el caso de un sistema de radar pasivo donde el IO está estático, como es el que interesa en este trabajo, el FDOA y la frecuencia Doppler generada por el blanco será la misma.

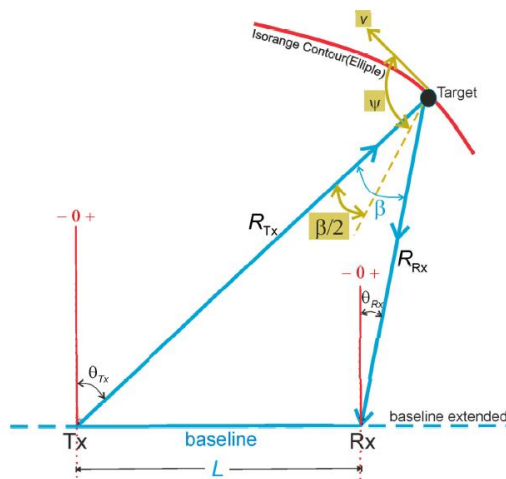


Figura 3-4. Determinación de movimiento con radar biestático [59].

En este caso la frecuencia Doppler [59] de una señal reflejada en un blanco en movimiento viene dada por la ecuación ( 3-6 ):

$$FDOA = f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\beta/2) \quad (3-6)$$

donde:

- $v$ : es la velocidad del contacto respecto a la línea de visión (Line of Sight, LOS). Se obtiene teniendo en cuenta la velocidad transmisor-contacto y receptor-contacto.
- $\beta$ : ángulo que forman las líneas transmisor-contacto y contacto-receptor.
- $\gamma$ : ángulo formado entre  $\beta/2$  y la dirección del movimiento del contacto.

Dependiendo del valor de los ángulos principales anteriormente mencionados, de cuales dependen las ecuaciones más importantes que describen las características del radar pasivo, se obtiene un valor determinado de la frecuencia Doppler. Algunos ejemplos de los resultados más representativos se encuentran en la Tabla 3-1 [59].

$\beta$	$\gamma$	$f_D$	Condición
0	-	$\frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos(\gamma)$	Monoestático
180	-	0	Monoestático
-	0/180	$\pm \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos(\beta/2)$	Movimiento en la línea transmisor-receptor. Doppler máximo (con coseno igual a 1).
-	$\pm 90$	0	Movimiento en perpendicular al receptor

**Tabla 3-1. Valores de la frecuencia Doppler según beta y gamma.**

Cabe destacar el hecho de que a menor beta (cuanto más lejos se encuentra el contacto) mayor es el valor del coseno de dicho ángulo.

### 3.2.1.3 Matriz rango-Doppler.

En un escenario biestático, la matriz rango-Doppler representa la correlación cruzada entre la señal recibida directamente del IO captada por la antena de referencia y la señal reflejada en el blanco captada por la antena de vigilancia. Esta correlación cruzada es función del retardo temporal de propagación determinado por la distancia biestática y la frecuencia Doppler determinada por la velocidad relativa del blanco. La correlación de estos datos da lugar a una matriz rango-Doppler bidimensional donde:

- Eje de rango ( $\tau$ ): representa la distancia biestática que se obtiene a partir del tiempo de propagación de la señal desde el IO hasta el blanco y luego hasta el receptor radar.
- Eje Doppler ( $f_D$ ): representa la frecuencia Doppler biestática que depende del movimiento relativo del blanco respecto a la línea base entre el IO y el receptor radar.

La expresión para determinar la correlación cruzada entre la señal directa y la señal reflejada y poder representar el mapa rango-Doppler viene dada por la ecuación ( 3-7 ) [48]:

$$\mathcal{X} [\tau, f_D] = \sum_{n=0}^{N-1} s_{surv}[nT_s] s_{ref}^*[nT_s - \tau] e^{-j2\pi f_D nT_s / N} \quad (3-7)$$

donde:

- $s_{ref}$ : señal de referencia directa del IO captada por el receptor.
- $s_{surv}$ : señal de vigilancia reflejada en el blanco y capturada por el array.
- $T_s$ : periodo de muestreo.
- $f_D$ : frecuencia Doppler.

En la Figura 3-5 y en la Figura 3-6 se puede observar un ejemplo de matriz rango-Doppler bidimensional y en 3D con tres blancos detectados, obtenida a partir de señales sintéticas. En el caso de la matriz en 2D se representa la detección de los blancos (amplitudes en dB) en función de la distancia biestática y de la frecuencia Doppler, mientras que en el caso 3D se representa en función del TDOA y del FDOA.

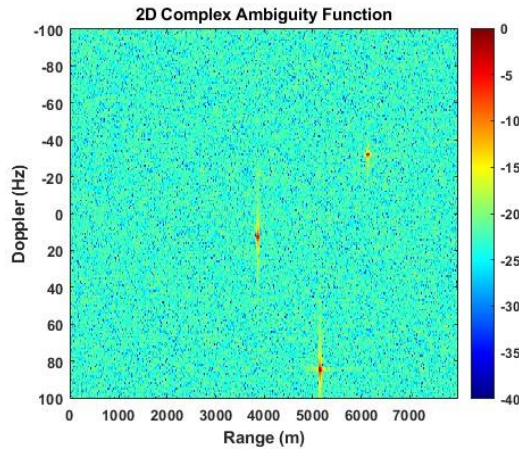


Figura 3-5. Matriz rango-Doppler bidimensional.

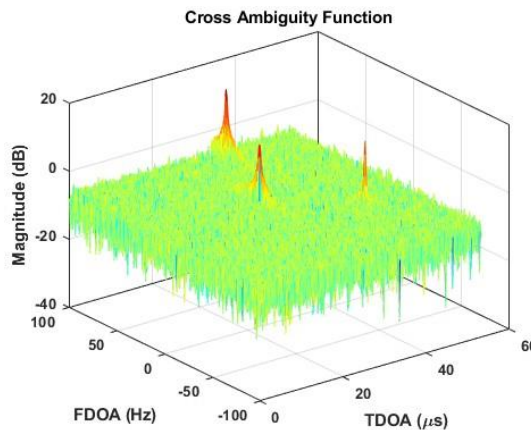


Figura 3-6. Matriz rango-Doppler tridimensional.

### 3.2.1.4 Parametrización de la SNR.

Los radares tienen un nivel mínimo de relación señal a ruido requerido que deben recibir para que el contacto sea detectado, es decir, para que la probabilidad de detección supere un determinado valor umbral; ya que, si el ruido es muy elevado, sin importar cuál sea su naturaleza, el contacto podría verse enmascarado por el mismo. En numerosas ocasiones se está más interesado en determinar cuál es la relación señal a ruido generada por un blanco a cierta distancia que la propia distancia de alcance máxima. En tal caso, la ecuación ( 3-5 ) se puede expresar en función de la SNR como:

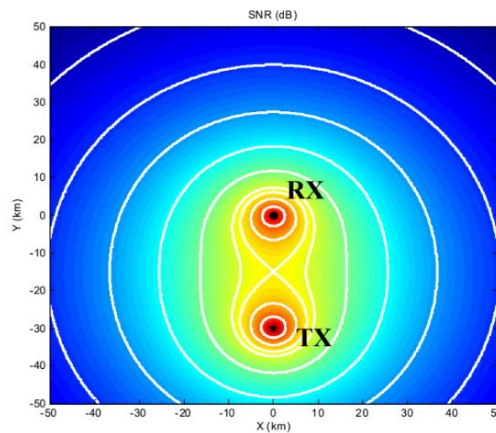
$$SNR = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_r}{k \cdot T \cdot B} \quad (3-8)$$

En este caso, el numerador representa la potencia de la señal recibida por el radar y el denominador el nivel de ruido recibido. Para garantizar la detección de un blanco, el valor de la SNR debe ser mayor que un umbral mínimo  $SNR_{minDET}$  definido por los requisitos del sistema. Si la SNR es inferior a este umbral, la señal reflejada queda enmascarada por el ruido y no se podrá distinguir el blanco en el entorno.

Despejando de la ecuación ( 3-5 ), se obtiene la fórmula básica que describe, según los diferentes parámetros existentes en cada caso, el valor de la SNR como [61]:

$$SNR = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}(\varphi, \theta) \cdot G_{RX}(\varphi, \theta) \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R_{TX}^2 \cdot R_{RX}^2 \cdot k \cdot T \cdot F \cdot B \cdot L_{loss}} \quad (3-9)$$

En un escenario pasivo, se deben tener en cuenta que las dos distancias al blanco, desde el emisor y el receptor ( $R_{TX}$  y  $R_{RX}$ ), difieren del típico  $R^4$  de un escenario radar tradicional. Al igual que se consideran las ganancias del iluminador de oportunidad como del receptor pasivo ( $G_{TX}(\varphi, \theta)$  y  $G_{RX}(\varphi, \theta)$ ), para un contacto situado en la dirección  $(\varphi, \theta)$ . Como característica a destacar de la SNR derivada de la ecuación ( 3-9 ), comentar que la relación señal a ruido para un determinado escenario será máxima cuando las distancias transmisor-blanco y blanco-receptor se apoyen sobre los llamados óvalos de Cassini [61].



**Figura 3-7. Óvalo de Cassini [61].**

El concepto de óvalo de Cassini (Figura 3-7) es un conjunto de puntos en un plano cuya multiplicación de las distancias desde cada punto a otros dos puntos fijos, llamados focos del óvalo, es constante. En nuestro caso, para los contactos situados en un óvalo, se obtiene el mismo valor en la multiplicación de la distancia del contacto al emisor, por la distancia al receptor, como se muestra en la siguiente ecuación ( 3-10 ) [61].

$$K = R_{TX} \cdot R_{RX} \quad (3-10)$$

En el Anexo VII: Representación de los Óvalos de Cassini. se adjunta una representación real de los óvalos de Cassini existentes en el escenario en el que se han llevado a cabo las mediciones del trabajo, junto con el código de Matlab empleado para ello.

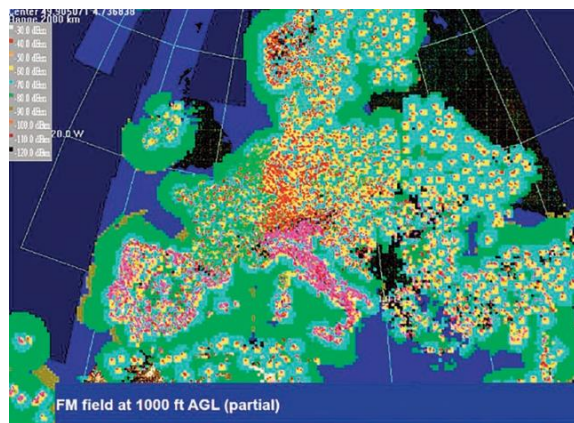
### 3.2.2 Iluminadores de oportunidad.

Existen diferentes tipos de IO que pueden ser utilizados para la detección de las señales con radares pasivos, pudiendo encontrarse ejemplos de iluminadores en [10]. Existen diferentes criterios para clasificarlos. Uno de los más empleados se basa en su localización, pudiendo pertenecer a la clase terrestre o espacial.

- Clase terrestre:
  - Otros tipos de radares, como los empleados en para el control del tráfico, tanto terreno como marítimo.

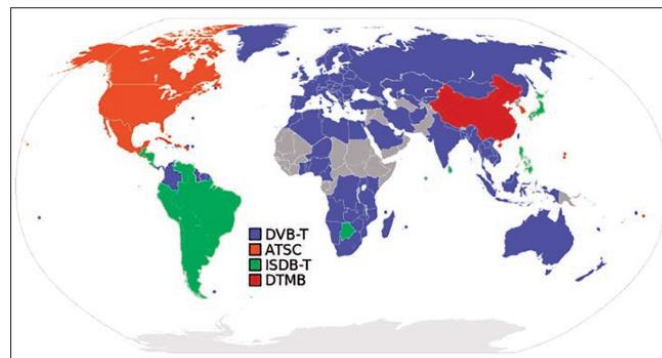
- Sistemas de comunicación móvil, como puntos de acceso WiFi (Wireless Fidelity) y estaciones para comunicaciones.
- Sistemas de transmisión para uso público, como señales radio. El tipo de señal que se utilizará en este caso será la emitida por las antenas de televisión (Digital Video Broadcast-Terrestrial, DVB-T) cercanas al recinto de la Escuela Naval Militar.
- Clase espacial:
  - Otros tipos de radares, como los empleados para monitorizar la Tierra.
  - Sistemas de transmisión para uso público, como los satélites empleados para la televisión.
  - Sistemas de comunicación móvil, como Iridium.
  - Sistemas de geolocalización como el GPS, GLONASS o GALILEO. Siendo los tres métodos, diferentes tipos de GNSS (Global Navigation Satellite System).

Aunque pueden usarse diferentes antenas emisoras, lo que se debe tener en cuenta es que la señal emitida sea confiable y continua a lo largo del tiempo, con una fuerte EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power). Por esta misma razón, otros tipos de radares no están incluidos en la lista anterior, ya que no se consideran óptimos para su uso en este ámbito.



**Figura 3-8. Localización de antenas FM en Europa [10].**

En la Figura 3-8 pueden observarse las numerosas situaciones geográficas de las antenas, pudiendo ser conscientes de la cantidad de IO existentes. Tener suficientes iluminadores es un factor muy importante, ya que el alcance del radar pasivo depende, principalmente, de la localización del transmisor. En nuestro caso, la fuente empleada serán los canales de televisión de la zona geográfica cercana a la Escuela Naval Militar (ENM). Es por esta razón por la cual se adjunta una imagen (Figura 3-9) de la cobertura de televisión digital, siendo este tipo de IO el que más se encuentra globalmente.



**Figura 3-9. Cobertura de señal de televisión digital [10].**

### 3.3 Detección en 3D.

Los trabajos realizados en [20] así como en [18] se basan principalmente en la detección de blancos marítimos a partir de radar pasivo por lo que tanto la detección como la localización se han desarrollado en el plano 2D. A la hora de mejorar la aplicabilidad de detección pasiva a vehículos aéreos surge la necesidad de poder detectar y posicionar los blancos en un escenario 3D incluyendo la altura del iluminador de oportunidad, del dron y de la antena receptora.

La determinación de la tercera coordenada, es decir, de la altura a la que se encuentra la detección radar, se determina conociendo las elevaciones de las antenas, emisora y receptoras; siendo éstas, en este proyecto, de 200 y 10 metros respectivamente. Mediante fórmulas de trigonometría y conociendo las otras dos coordenadas, se podría obtener el valor de la altura óptima de vuelo del dron. Como se comentará en capítulos posteriores, para una mejor detección de los blancos aéreos es de interés que la antena receptora de vigilancia no esté apuntando a un ángulo de elevación de  $0^\circ$  sino a una elevación ligeramente mayor aproximadamente de  $4^\circ$  lo que permite reducir también los ecos no deseados de blancos con Doppler 0 del entorno y la captación en la antena receptora de la señal directa procedente del IO.

En [62], se tiene como objetivo principal la mejora de las técnicas de detección y seguimiento en radares pasivos con configuraciones biestáticas y multiestáticas empleando diferentes tipos de iluminadores de oportunidad entre los que se encuentran los transmisores DVB-T, satélites DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) y señales GPS. Diseñan técnicas de seguimiento de blancos capaces de integrar información en el espacio 3D (rango, Doppler y acimut). Estas técnicas se basan en el procesado en dos etapas.

- Seguimiento en 2D filtrando falsas alarmas.
- Seguimiento en 3D y la conversión de coordenadas a un plano local cartesiano.

Además, emplean el uso de señales DVB-T multicanal con espacios de transmisión entre los canales, incrementando la resolución del sistema y sus capacidades de detección, seguimiento y localización.

En el Anexo IV: Código Simulaciones Matlab. se pueden observar las diferentes configuraciones del transmisor y tres contactos, variando e introduciendo información en las tres dimensiones, además de la representación gráfica del movimiento en 3D (Figura 3-10).

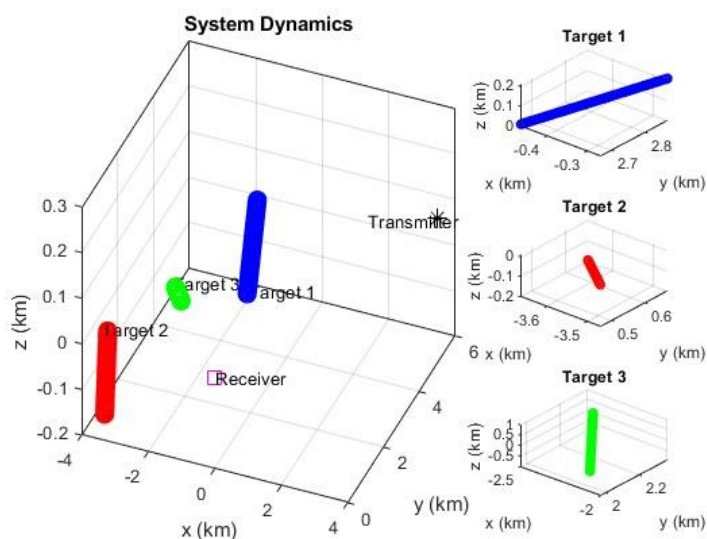


Figura 3-10. Representación movimiento tres contactos en 3D.

### 3.4 Sección equivalente radar de un dron.

Se debe tener en cuenta que la correcta detección del dron dependerá de diferentes factores, entre los que se encuentra la Sección Transversal/Equivalente de Radar (RCS) del dron, es decir, la medida de cuánta energía de la emisión radar es reflejada por ese objeto hacia el receptor. La RCS de un blanco describe la efectividad o facilidad con la que un objeto refleja la señal electromagnética incidente. A mayor RCS, más fácil será, para el radar, detectar y rastrear el objeto. La letra griega sigma ( $\sigma$ ) representa este concepto en las ecuaciones y su unidad es el metro cuadrado ( $m^2$ ) [63]. Algunas características de las que depende la RCS son:

- Tamaño, forma y material. Mayor superficie, áreas reflectantes y materiales conductores provocan que la RCS sea mayor.
- Ángulo de incidencia. Según la parte del blanco en la que incide la onda, la RCS posee un valor diferente (Figura 3-11). Este concepto se desarrollará en profundidad más adelante.

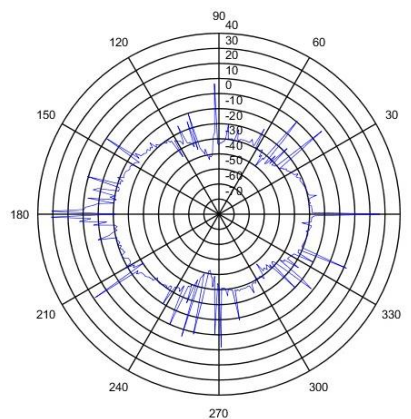


Figura 3-11. RCS cambiante según el lugar de incidencia de las ondas.

- Frecuencia de la señal. La RCS de un objeto puede ser elevada para determinadas frecuencias y ser más pequeña en otras. A mayor frecuencia, mayor RCS.

La sección transversal del radar es la relación entre la energía reflejada por una esfera lisa de  $1 m^2$  que emite de forma homogénea en todas las direcciones y la reflejada, por un blanco en concreto, en la dirección del radar. En la Figura 3-12 pueden observarse las ecuaciones empleadas para el cálculo de la RCS de las formas geométricas más comunes entre las que se encuentra una esfera, un cilindro y una placa.

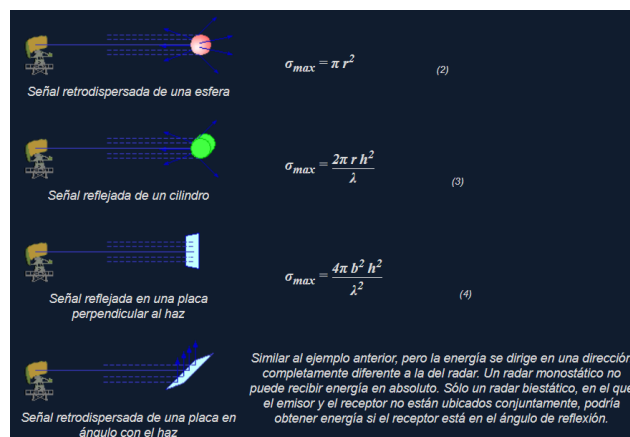


Figura 3-12. Sección radar equivalente para diferentes tipos de blancos [63].

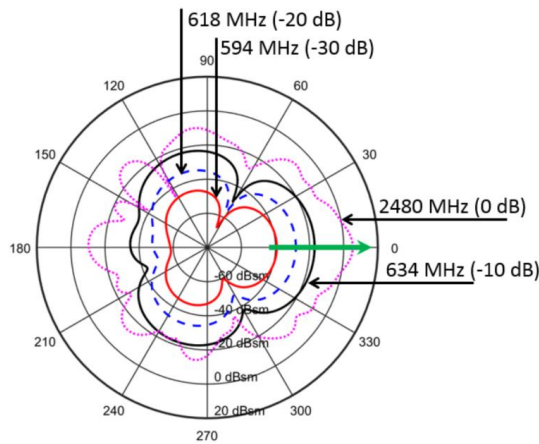
Para el cálculo de la sección transversal del radar, se tiene en cuenta que el blanco actúa teóricamente como una esfera que dispersa la señal en todas las direcciones. Teniendo en cuenta que su superficie es  $4\pi r^2$ , se obtiene el siguiente valor de sigma:

$$\sigma = 4\pi r^2 \cdot \frac{S_r}{S_t} \quad (3-11)$$

donde:

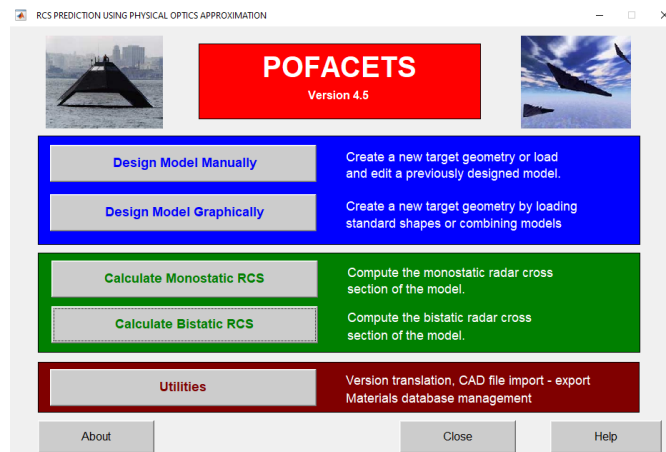
- $S_r$ : densidad de potencia dispersa en el lugar de recepción [ $W/m^2$ ].
- $S_t$ : densidad de potencia del transmisor en el blanco del radar [ $W/m^2$ ].

En esta ecuación ( 3-11 ), se puede observar que no se incluyen las pérdidas explícitamente, como sería el caso de la atenuación del espacio libre. Esto se debe a que ya se encuentran inmersas en la ecuación; pudiendo observar la diferencia entre la potencia generada por el transmisor y la que llega al receptor.



**Figura 3-13. Variación de la RCS según la frecuencia radar [64].**

En este trabajo, se han llevado a cabo simulaciones en un Toolbox de Matlab llamado Pofacets (Figura 3-14) para demostrar esta variación. Los resultados pueden obtenerse tanto variando el ángulo de incidencia de la onda, como la frecuencia de emisión de la antena, pudiendo obtener imágenes similares a las dadas por la Figura 3-13.



**Figura 3-14. Página principal Pofacets.**

La herramienta Pofacets es una interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface, GUI) en Matlab, desarrollada por David C. Jenn; profesor y director de la US Naval Postgraduate School, que utiliza una aproximación de óptica física (Physical Optics, PO) para predecir la RCS de objetos complejos y es precisa para frecuencias relativamente altas [65].

Permite simular la RCS para distintos ángulos de incidencia y observación, ajustar la rugosidad de la superficie y la resistividad del material, además de elegir la polarización y frecuencia de operación. También permite importar archivos de modelado (.STL) y visualizar los resultados en gráficos 3D. Además, de permitir cambios en los materiales de los objetos para estudiar el cambio de la RCS [65].

La explicación de cómo emplear esta herramienta se encuentra en el Anexo III: Interfaz Gráfica: Pofacets., donde se describe cómo importar archivos y una vez realizado este primer paso, calcular la RCS del objeto en diferentes situaciones, desde la elección de simular los resultados con un radar monoestático o biestático, hasta variar la frecuencia que emplea y el ángulo de incidencia de la señal en el contacto.

## 4 DESARROLLO DEL TRABAJO.

### 4.1 Parametrización del sistema de radar pasivo.

A lo largo de este trabajo se han llevado a cabo diferentes experimentos con el objetivo de maximizar la probabilidad de detección de un dron. Las primeras pruebas se realizaron con señales sintéticas en un entorno de Matlab que permiten mover los blancos por la posición y a la velocidad deseada, generar ecos con una RCS determinada, establecer unos límites a la SNR mínima requerida en la recepción, etc. Con todo ello, se trató de analizar cuál sería la mejor configuración de los diferentes parámetros radar que nos permitirían detectar un dron ya en un escenario real. Se han realizado diferentes cambios en la configuración del transmisor radar del script de Matlab para conseguir variar las características de éste e ir comprobando la detectabilidad de los pequeños objetos.

Una vez comenzada la fase de detección real, los elementos empleados para crear el escenario pasivo fueron utilizar la antena de televisión DVB-T emisora, situada en Poio, en posición  $42^{\circ}26'40''$  N  $008^{\circ}39'36''$  W, con una altura de 200 metros como IO, una antena Televés DAT BOSS UHF como antena receptora del canal de referencia y un array de antenas Televés Dinova BOSS DVB-T para recibir las señales de vigilancia, situado en el edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa (CUD) de la ENM, teniendo como posición  $42^{\circ}23'52''$  N  $008^{\circ}42'24''$  W y altura 10 metros. La distancia entre ellas es de 6,5 kilómetros. En la Figura 4-1 se muestra este escenario entre el IO y el receptor. Esta imagen representa las diferentes distancias entre IO, blanco y receptor que han sido definidas anteriormente. Además, se indica la dirección en la que se mueve un posible blanco. Como se explica en el siguiente capítulo, si el contacto se encontrara en la línea base emisor-receptor, el Doppler estimado sería 0. En un principio, para la detección del dron sería suficiente con la utilización de una única antena del conjunto de antenas del array. Sin embargo, si se quiere posicionar sobre un mapa de coordenadas se requerirá al menos otra antena de vigilancia para poder determinar el DoA.

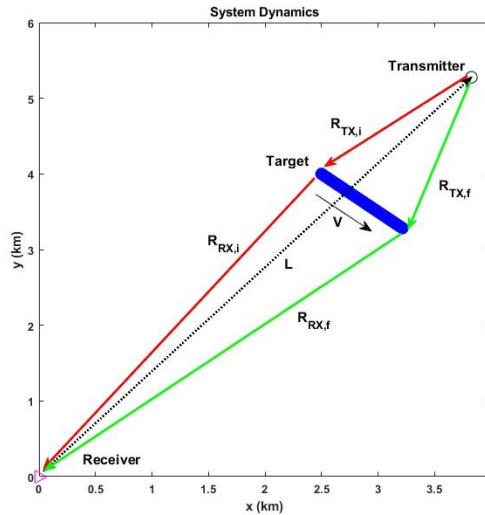


Figura 4-1. Representación distancias contacto.

En cualquiera de los experimentos basados en señales sintéticas o en señales reales, el objetivo es calcular el mapa rango-Doppler a partir de la correlación cruzada de la señal directa y la señal reflejada en el blanco. Utilizando sólo una de las antenas de vigilancia del array receptor se obtendría la distancia biestática del blanco y su Doppler, es decir, se conocería la elipse en la cual puede encontrarse el blanco, como se representa en la Figura 3-3, pero no sus coordenadas exactas. Si se hace uso de más de una antena receptora del array se podría eliminar esa incertidumbre determinando el DoA de llegada de la señal.

A continuación, se analizará la configuración de una serie de parámetros que nos permita maximizar la probabilidad de detección de un blanco de tamaño reducido como un dron.

#### 4.1.1 Ancho de banda.

La resolución en distancia ( $\Delta R$ ) de un sistema de radar pasivo que permite discriminar blancos próximos viene caracterizado por el ancho de banda ( $B$ ) de la señal emitida por el IO como se puede ver en la ecuación ( 4-1 ). En principio es un parámetro que depende del IO que se esté utilizando. En este caso, el ancho de banda viene determinado por el ancho de banda de un canal de DVB-T que es de 8 MHz. Sin embargo, en el entorno en el que se desarrolla el trabajo, el IO dispone de diferentes canales contiguos que se pueden utilizar simultáneamente, permitiendo aumentar el ancho de banda de la señal recibida y disminuyendo el valor de la discriminación en distancia del radar, lo que aumenta su capacidad de detección. Un valor menor en la ecuación ( 4-1 ), proporciona una mejora al sistema, ya que este resultado indica la distancia mínima a la que deben encontrarse dos blancos para ser capaces de detectarlos de forma correcta, siendo representados dos ecos diferentes en sus respectivas localizaciones. Para una mejor explicación se proporciona un ejemplo, si se tiene un valor de  $\Delta R$  igual a 10 metros, esto indica que los blancos que se encuentren a una distancia menor a esta, no se podrán representar por separado, obteniendo una detección incorrecta.

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B \cdot \cos(\beta/2)} \tag{4-1}$$

siendo:

- $\Delta R$ : discriminación en distancia (medida en metros)
- $c$ : velocidad de la luz con valor igual a  $3 \cdot 10^8$  m/s
- $B$ : ancho de banda (medido en Hercios)

- $\beta$ : ángulo formado entre el contacto, transmisor y receptor, como puede observarse en la Figura 3-4 y que se vuelve a mostrar en la Figura 4-2.

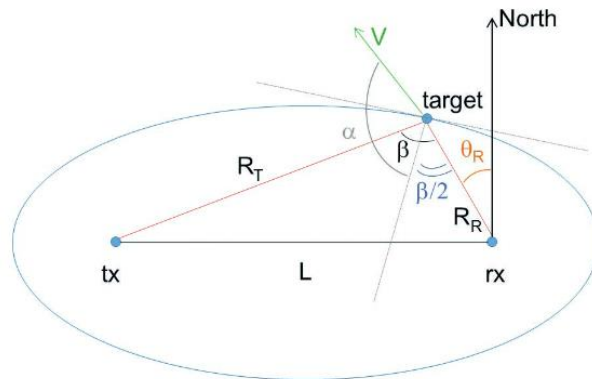


Figura 4-2. Esquema de la geometría bistática en coordenadas cartesianas 2D [48].

Como se puede observar, la resolución será máxima cuando  $\beta$  tiende a  $0^\circ$ . Cuando el valor de este ángulo tiende a  $180^\circ$  y, por lo tanto, la mitad es igual a  $90^\circ$ , el valor del coseno es igual a cero. Esto hace que tanto la discriminación en distancia como en velocidad sean iguales a cero.

Este caso ocurre cuando el contacto se encuentra muy cerca de la línea transmisor-receptor. Como consecuencia, no se observa variación en la velocidad ni frecuencia, obteniéndose un Doppler del contacto nulo. Esto puede provocar una incorrecta interpretación de la cinemática y posición del contacto.

#### 4.1.2 Intervalo de procesamiento coherente.

La resolución en velocidad ( $\Delta v$ ) o frecuencia Doppler de un sistema de radar pasivo que permite diferenciar velocidades contiguas viene determinado por la longitud del intervalo temporal ( $T_{CPI}$ ) de las señales recibidas a procesar. Este intervalo de tiempo se conoce como intervalo de procesamiento coherente (Coherent Processing Interval, CPI) y típicamente se establece en torno a 1 segundo, aunque esta elección depende en gran medida de la velocidad del blanco que se espera detectar. Para blancos con movilidad muy alta, el tiempo de integración se tiene que reducir porque en caso contrario el blanco podría salirse de la celda de resolución y el mapa rango-Doppler sería borroso. Al contrario, para blancos que se muevan a una velocidad relativamente baja el tiempo de integración se podría aumentar mientras el blanco se mantenga en las mismas celdas de la matriz rango-Doppler. A mayor tiempo de integración, menor será el valor obtenido en la ecuación (4-2), mejorando la detección en este aspecto [66]. En este trabajo se analizará cual es el intervalo de integración que mejor se ajusta a la detección de drones.

La resolución de la velocidad bistática en función del tiempo de integración coherente viene definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2 \cdot T_{CPI} \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\beta/2)} \quad (4-2)$$

donde:

- $\lambda$ : longitud de onda
- $T_{CPI}$ : es el periodo de tiempo en el que el receptor adquiere la señal, es el intervalo de procesamiento coherente. La duración del CPI determina la precisión con la que el radar puede observar objetivos de diferentes velocidades radiales.

- $\gamma$ : ángulo formado entre  $\beta/2$  y la dirección del movimiento del contacto.

Entre las limitaciones del sistema de radar pasivo cabe mencionar que, si el blanco se mueve por la línea base entre transmisor y receptor, no es posible determinar la distancia a la que se encuentra. Esto ocurre porque se recibe al mismo tiempo la señal de referencia directamente del emisor y la reflejada en el contacto; no habiendo diferencia de tiempo en la recepción. Esto puede comprobarse en la ecuación ( 4-2 ) de velocidad biestática,  $\Delta v$ , ya que se tendría un valor del coseno igual a  $0^\circ$ .

Además, según la potencia de emisión del IO, el rango de cobertura del sistema será mayor o menor. Se obtienen mayores alcances con señales de Frecuencia Modulada (FM) y DVB-T, y más reducidos con Global Navigation Satellite System (GNSS) y Digital Video Broadcasting by Satellite (DVB-S).

En el presente trabajo se han llevado a cabo diferentes mediciones, de la misma detección, suponiendo diferentes valores de duración del CPI. Este cambio provoca cambios en la calidad de la detección. En la Tabla 5-1 podrá verse corroborado ya que el valor de la SNR, es decir, la diferencia entre la señal y el ruido es mayor a medida que el intervalo aumenta.

En [67], se realizan diferentes estudios empleando señales de vídeo digital y radares pasivos, donde se consiguen detectar drones (fueron empleados, aproximadamente, unos 45 UAVs) en los ejercicios Robotic Experimentation and Prototyping Augmented by Maritime Unmanned Systems 22 (REPMUS 22) del Ministerio de Defensa, en los cuales se realizan pruebas a gran escala con sistemas no tripulados en un entorno multinacional y cooperativo, como puede verse definido en el siguiente documento de la OTAN [68]. En ese mismo documento puede comprobarse cómo es posible la correcta detección de UAVs con radar pasivo empleando señales de televisión cercanas.

#### *4.1.3 Frecuencia de la señal.*

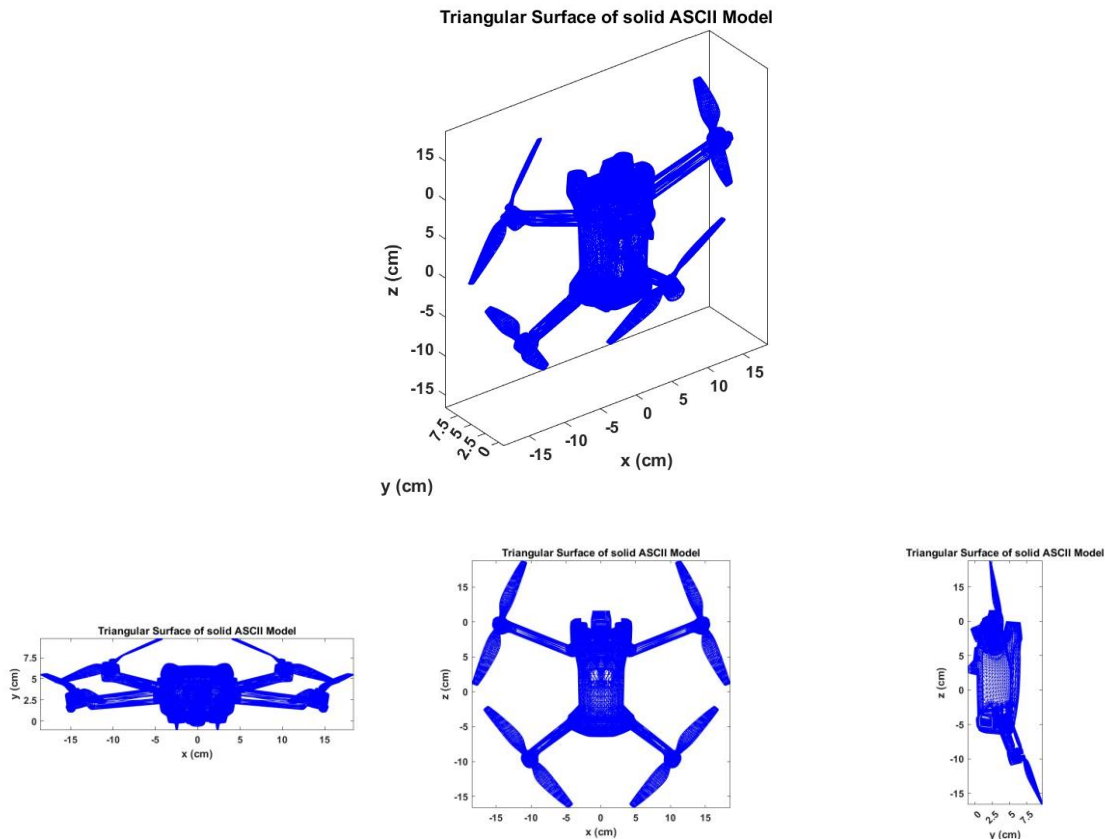
Otro parámetro de interés para configurar y aumentar la probabilidad de detección reside que canal de DVB-T utilizar entre los disponibles. Para ello, se tuvo en cuenta, por un lado, a qué frecuencia un determinado blanco genera la mayor RCS posible y, por otro lado, cuál es el canal de DVB-T más cercano a dicha frecuencia.

Para analizar la RCS del dron en función de la frecuencia, se importó un modelo CAD del dron [69] con las mismas dimensiones al utilizado en las detecciones reales. En la Figura 4-3 está representado este modelo 3D del dron que ha sido importando a Pofacets. Se puede encontrar el método para importar archivos .STL a Pofacets en el Anexo III: Interfaz Gráfica: Pofacets..



**Figura 4-3. Archivo CAD importado (.STL) [69].**

Una vez cargado el modelo en Pofacets, la Toolbox permitirá entre otras funciones, estimar la RCS de dicho modelo en función de la frecuencia o del ángulo de incidencia de la señal biestática. En primer lugar, se muestra la representación del dron en tres dimensiones, ya dentro de la herramienta de Pofacets (Figura 4-4).

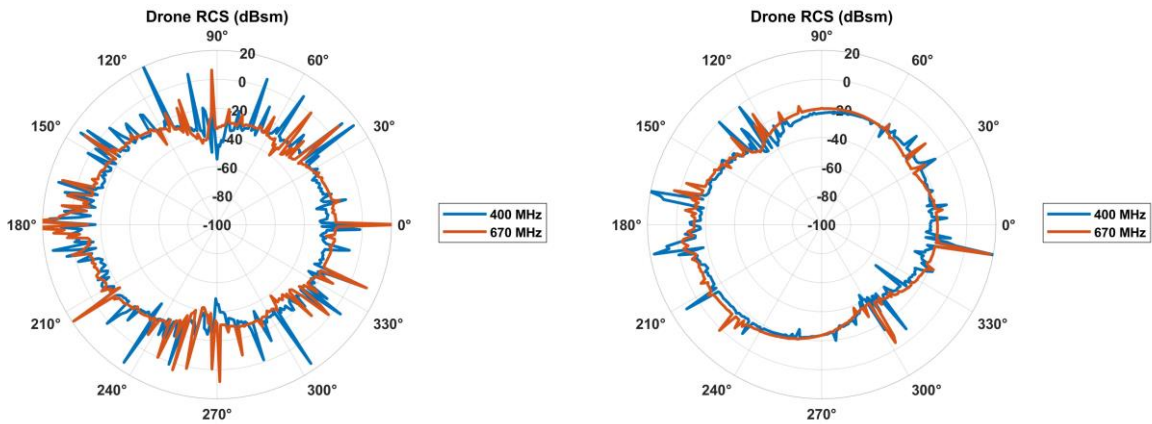


**Figura 4-4. Representación dron en las tres dimensiones.**

Después de los diferentes reajustes del dividendo digital, la banda de DVB-T en España se extiende desde los 470 MHz para los canales inferiores hasta los 782 MHz para los canales superiores, aunque raramente se reciben canales por encima de 694 MHz. Dentro de esta banda, se han escogido las frecuencias de 400 MHz y 670 MHz para la simulación de la RCS del dron.

En la Figura 4-5 (a) puede observarse el valor de la RCS obtenido para una frecuencia de 400 MHz, considerando un ángulo de incidencia de la señal en el blanco de  $\theta = 0^\circ$  y  $\varphi = 0^\circ$  teniendo en cuenta la posición en vertical del dron. Aunque de forma ligera, se puede apreciar que a mayor frecuencia mayor RCS. Los valores medios de la RCS en función de la frecuencia pueden observarse en la Tabla 4-1.

Para evitar picos bruscos en la estima de la RCS, es interesante evitar las aristas del dron. Para ello, se modificó el ángulo de incidencia de la señal en el blanco a  $\theta = 10^\circ$  y  $\varphi = 10^\circ$ . Como se puede apreciar en la Figura 4-5 (b), el valor de la RCS se mantiene similar al caso anterior, pero los picos bruscos se han reducido de forma drástica. De nuevo, los valores medios de la RCS en función de la frecuencia son recogidos en la Tabla 4-1. En este caso, se verifica que la RCS aumenta con la frecuencia, pasando de un valor de -21,8 dBsm para una frecuencia de 400 MHz a un valor de -20,6 dBsm para una frecuencia de 670 MHz.



a)  $\theta = 0^\circ$  y  $\varphi = 0^\circ$

b)  $\theta = 10^\circ$  y  $\varphi = 10^\circ$

**Figura 4-5. Representación RCS para diferentes frecuencias y ángulos de incidencia.**

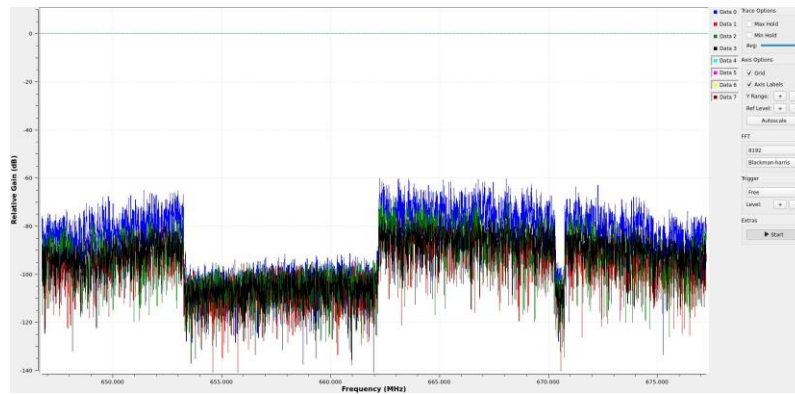
El valor medio de la RCS obtenido en la simulación en ambos casos se encuentra ligeramente por debajo de -20 dBsm, lo que concuerda con los datos obtenidos en [64]. De esta forma, se verifica que a mayor frecuencia de la transmisión del IO (670 MHz) mayor será la RCS generada por el dron y mayor será la probabilidad de detección.

En la Tabla 4-1 se muestran los resultados anteriormente comentados de RCS (dBsm) en función de la frecuencia de la señal reflejada y en función del ángulo de incidencia.

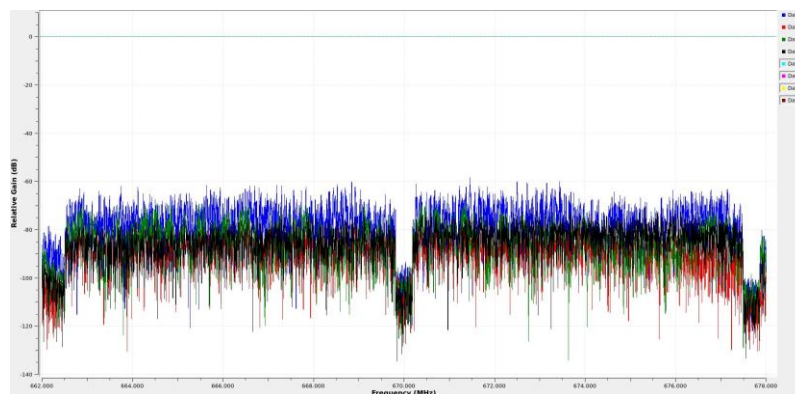
	400 MHz	670 MHz
$\theta = 0^\circ$ $\varphi = 0^\circ$	-20,7 dBsm	-20,6 dBsm
$\theta = 10^\circ$ $\varphi = 10^\circ$	-21,8 dBsm	-20,6 dBsm

**Tabla 4-1. Valor de la RCS en función de la frecuencia y ángulos de incidencia.**

La elección de la frecuencia a 670 MHz para calcular la RCS no fue arbitraria (de hecho, se podría establecer una frecuencia a 692 MHz en el último canal disponible), sino que se hizo con el objetivo de localizar varios canales juntos y aumentar el ancho de banda disponible para aumentar la resolución en distancia. En su momento, se disponían de 4 canales contiguos activos (desde 646 MHz hasta 678 MHz) lo que permitía utilizar un ancho de banda de 32 MHz y aumentar la resolución en distancia al máximo. A la hora de detectarlos, se observó que el canal centrado en 658 MHz no se encontraba operativo, como se puede observar en la Figura 4-6 (a) por lo que la detección pasó a realizarse solo con dos de los canales de 662 MHz a 678 MHz (ancho de banda total de 16 MHz, 8 de cada canal), siendo estos los de mayor frecuencia para obtener la mayor RCS posible del dron.



a)



b)

Figura 4-6. Dos canales reales captados con las antenas receptoras.

En la Figura 4-6 (b) se visualizan las dos frecuencias contiguas que se han empleado en las mediciones que se encuentran entre 662 y 678 MHz, encontrándose el punto central de cada canal en 666 y 674 MHz, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 4-7 se visualiza el espectro completo de DVB-T emitido por el IO de Poio, donde se puede comprobar que no existe la posibilidad de adjuntar más de 2 canales contiguos que los ya seleccionados y por lo tanto serían los seleccionados para llevar a cabo la detección del dron.

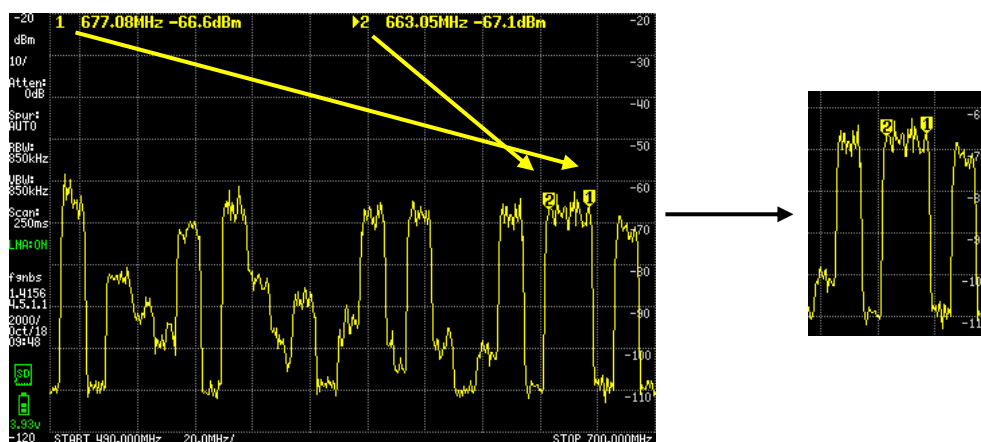
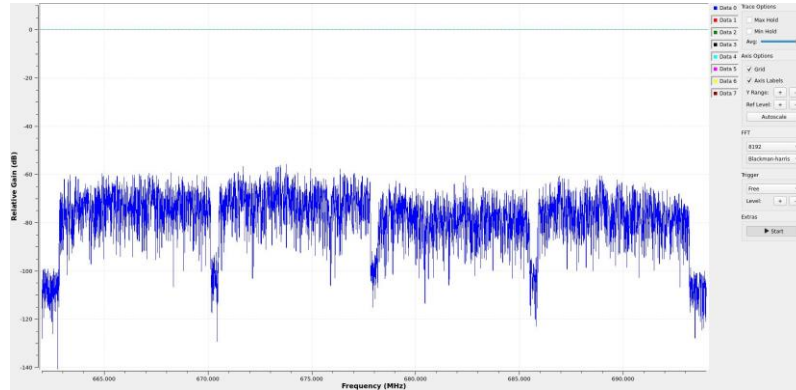


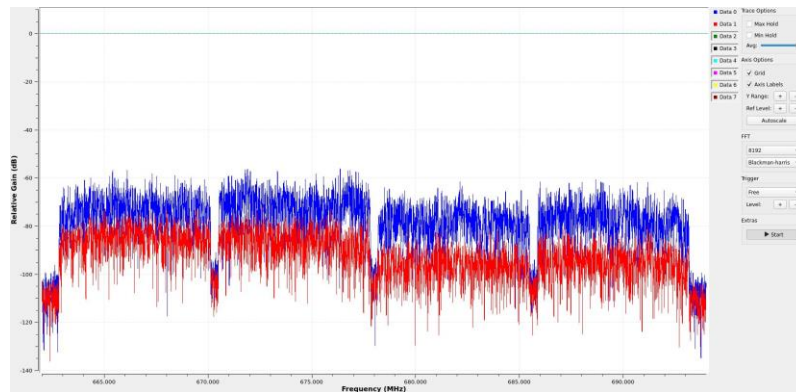
Figura 4-7. Rango de dos canales empleados en las pruebas de detección.

Avanzado el desarrollo del TFG, se pudo verificar que, en algunos momentos dados, el canal inmediatamente superior al que se estaba utilizando estaba activo, de esta forma se pudieron detectar cuatro canales contiguos, siendo estos incluso de mayor frecuencia a los empleados anteriormente. En

esta nueva situación, se podría aumentar la resolución en distancia del sistema al disponer de un ancho de banda de 32 MHz, desde 662 MHz hasta 694 MHz. De esta manera, al ser canales transmitiendo a una frecuencia mayor, la RCS del dron también será ligeramente mayor, aumentando su probabilidad de detección. En la Figura 4-8 y en la Figura 4-9 se muestra el espectro de los cuatro canales recibidos y el espectro de DVB-T completo.



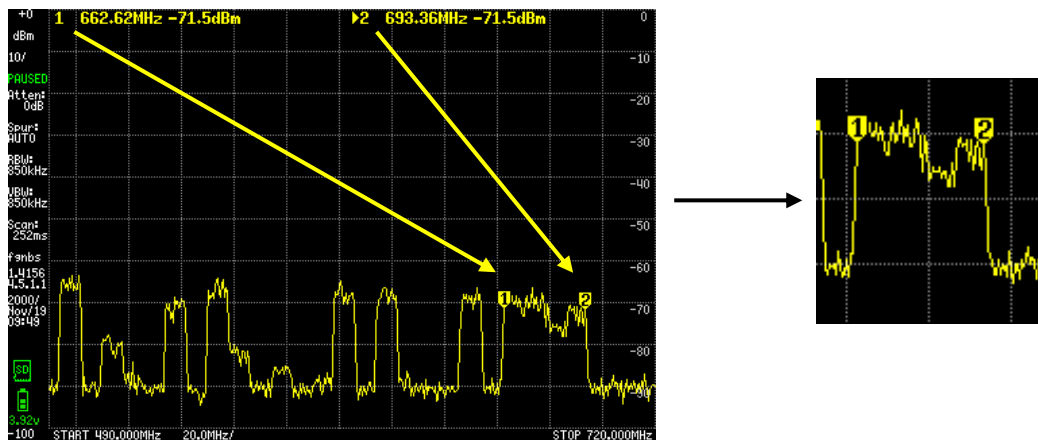
a)



b)

**Figura 4-8. Cuatro canales reales captados con las antenas receptoras.**

A continuación, se adjunta una imagen del espectro de frecuencias DVB-T. Las cuatro bandas de frecuencia se encuentran entre 662 y 693 MHz.



**Figura 4-9. Rango de cuatro canales empleados en las pruebas de detección.**

#### 4.1.4 Parámetros para simulación con señales sintéticas.

En la simulación de las detecciones de los contactos con Matlab a partir de señales sintéticas se han empleado diferentes códigos derivados de trabajos anteriores [20]. La ejecución se ha realizado con dos scripts diferentes, uno simulando la señal transmitida por el IO y otro simulando las señales captadas por el receptor radar:

- Emisor: código que simula la señal emitida (DVB-T), configurando sus diferentes características entre las que se encuentran la frecuencia de emisión, el ancho de banda transmitido, PRF si es una señal pulsada, entre otros. Incluso durante este trabajo, se utilizaron señales reales recibidas y grabadas de DVB-T de onda continua (CW) como señales sintéticas transmitidas por el IO. De esta manera, introduciendo los datos de un blanco sintético, se puede crear una representación de cómo sería la detección con la señal real. En esta parte, también se introducen diferentes valores característicos del dron, como su posición, rumbo, velocidad y RCS.
- Receptor: en esta parte, se simulan todas las características que tienen relación directa con el receptor radar. Se añaden las coordenadas GPS de las antenas receptoras (antena de vigilancia y de referencia), se selecciona el número de antenas de vigilancia si se considera un array de antenas, se determina el ancho de banda disponible por el radar para determinar la resolución en distancia y se determina también la longitud del intervalo de integración coherente.

Los diferentes parámetros de llamada a los códigos empleados pueden encontrarse en el Anexo IV: Código Simulaciones Matlab. del presente documento. En la programación se deciden y varían los siguientes datos:

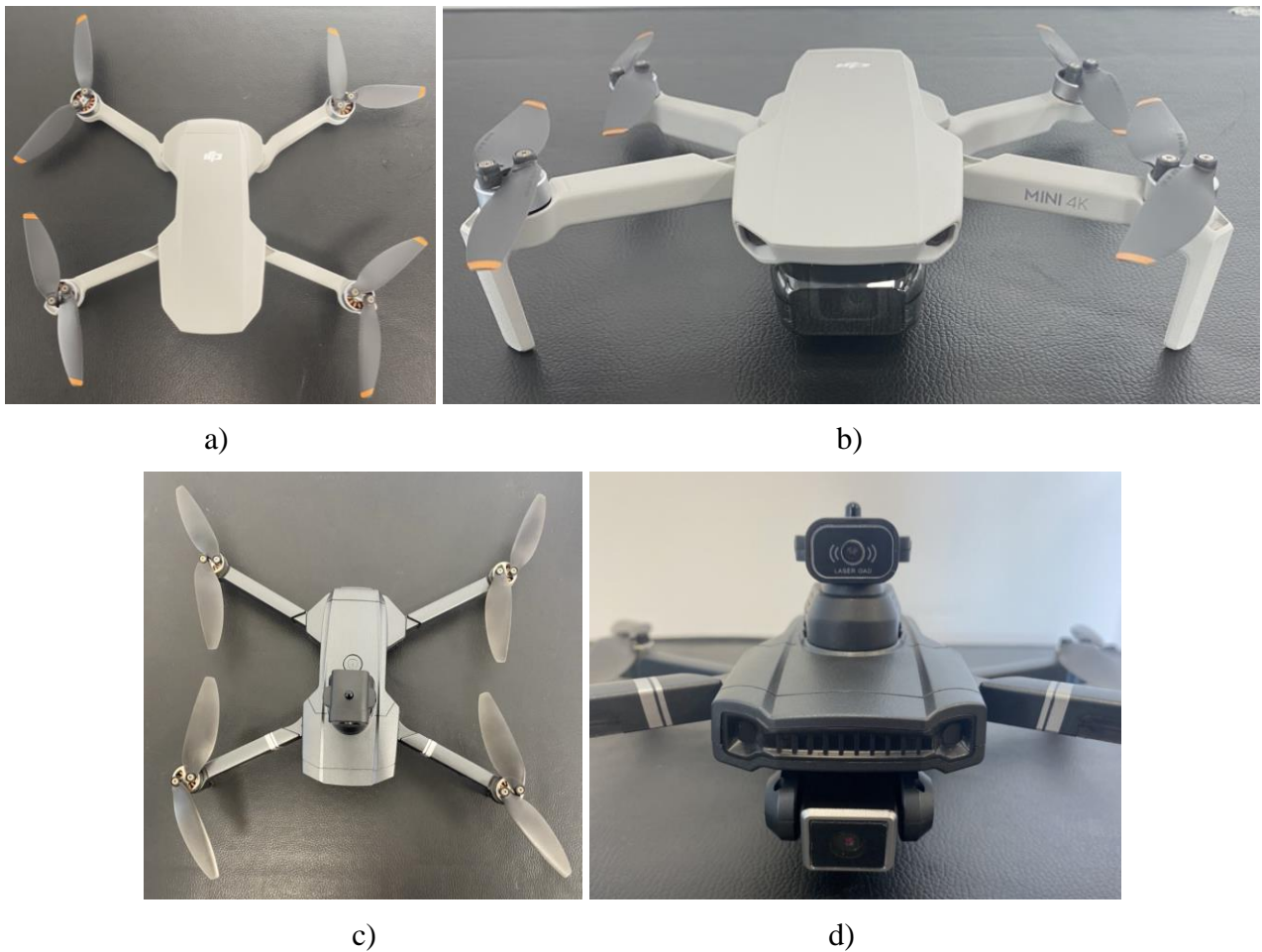
- Frecuencia central de la señal empleada ( $f_c$ ): se ha utilizado una frecuencia de 538 MHz en las mediciones con ancho de banda de 8 MHz para un único canal. En los casos en los que se aumenta el ancho de banda a 16 o 32 MHz, la señal se encuentra centrada en diferentes valores, 666 MHz, 674 MHz, 682 MHz y 690 MHz.
- Ancho de banda ( $f_s$ ): se elige el ancho de la señal/es empleada/s en función del número de canales usados en la medición. Este parámetro a su vez fija la frecuencia de muestreo mínima necesaria (8 MHz, 16 MHz o 32 MHz).
- Elección entre el empleo de una señal simulada pulsada con PRF o una señal de televisión recibida y grabada real (CW).
- Localización y características de la antena emisora y receptora.
- Duración de la simulación.
- Localización de los contactos: indicando su posición inicial en tres dimensiones, rumbo y velocidad.
- RCS del contacto: empleando valores de 0,01 (-20 dBsm) y 0,001 (-30 dBsm) según lo analizado con Pofacets.
- Se decide la distancia, frecuencias y CPI con el que ejecutar la señal recibida, de tal forma que se representa la detección entre los límites elegidos. Los dos primeros datos han variado

según la detección simulada, ajustando las distancias y frecuencias a las esperadas, y el tiempo de CPI, encontrándose entre uno y seis segundos.

- CFAR: es un algoritmo que a partir de una probabilidad de detección y de falsa alarma identifica o no blancos en un mapa rango-Doppler. Nos indica si se detecta el blanco.

#### 4.2 Dispositivos empleados.

Al no disponer de la licencia para volar drones, el máximo peso del objeto que se puede volar es de 250 gramos, lo que limita su tamaño, haciendo más difícil su detección. Se han empleado dos drones diferentes, ambos tienen un peso de 249 gramos y son los representados en la Figura 4-10. Las imágenes a) y b) son del dron DJI Mini 4K y las imágenes c) y d) del dron HYTOBP S179.



**Figura 4-10. Drones empleados en las mediciones.**

El control del dron es muy sencillo, este se lleva a cabo con un mando compuesto por dos palancas de mando (joystick), controlando su altitud, dirección y velocidad de movimiento. En la Figura 4-11 (a) se encuentra el mando del dron DJI Mini 4K y en la (b) el controlador del HYTOBP S179.



a)



b)

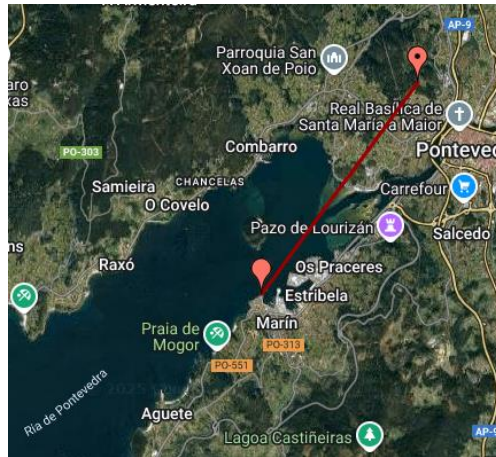
**Figura 4-11. Mando de control del dron.**

Los drones poseen las siguientes características (Tabla 4-2) ([70] y [71]):

<b>Características</b>	<b>DJI Mini 4K</b>	<b>HYTOBP S179</b>
<b>Peso</b>	249 gramos	249 gramos
<b>Dimensiones (hélices desplegadas)</b>	29,8 x 37,3 x 10,1 centímetros	34 x 25 x 9 centímetros
<b>Tiempo máximo de vuelo</b>	34 minutos	12-13 minutos
<b>Distancia de transmisión (mando de control)</b>	Sin interferencias: 20 kilómetros Con interferencias (edificios): 500 metros	120-150* metros  * según fabricante
<b>Material</b>	Nylon y fibra de vidrio	ABS

**Tabla 4-2. Características drones empleados.**

En la Figura 4-12 se observa la localización tanto de la antena emisora de la señal DVB-T situada en Poio como las receptoras en la ENM, Marín. Entre ellas existe una distancia de 6,468 kilómetros [72].



Point 1:  ,   
 Point 2:  ,   
 Distance: **6.468 km** (to 4 SF)  
 Initial bearing: **216° 17' 49"**  
 Final bearing: **216° 15' 55"**  
 Midpoint: **42° 25' 16" N, 008° 41' 00" W**

**Figura 4-12. Localización antenas [72].**

A continuación, se añaden unas imágenes para enseñar el radar pasivo que ha sido empleado en el proyecto, estando éste formado por un array de cuatro antenas (aunque en principio, para la detección de blancos es suficiente con utilizar una de ellas), más la de referencia (Figura 4-13).



**Figura 4-13. Antenas pasivas empleadas (cuatro receptoras más la de referencia).**

En la siguiente imagen puede apreciarse en detalle la antena de referencia orientada hacia el transmisor de la señal de televisión situada en Poio (Figura 4-14).



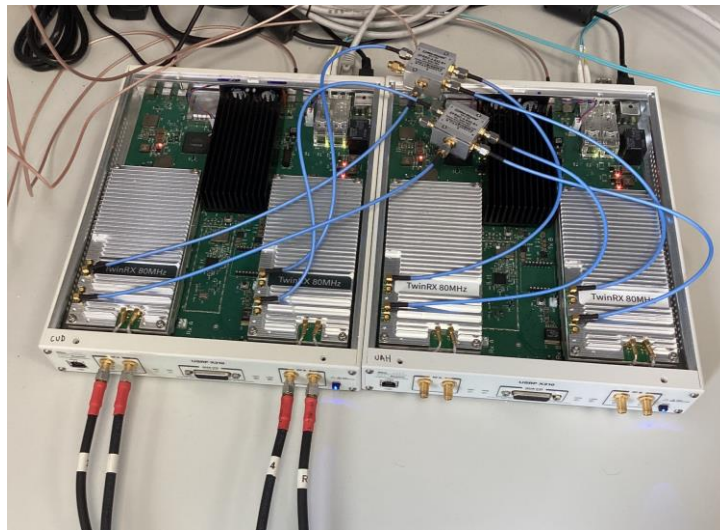
**Figura 4-14. Antena de referencia.**

En esta última imagen, se pueden observar las cuatro antenas receptoras (Figura 4-15). Todas se encuentran orientadas hacia la misma dirección y sentido, pero como se comentó anteriormente, el empleo de más de una permite situar el dron no solo en una elipse, si no en su posición en concreto. Esto se consigue gracias a la diferencia de tiempo en la que las antenas reciben la señal (TDOA). Como se mencionó anteriormente, el eje rotor que soporta las antenas del array se apuntó con una elevación de  $4^\circ$  con el fin de mejorar la detección del dron y evitar en la medida de lo posible los ecos de la costa a Doppler cero.



**Figura 4-15. Array de cuatro antenas.**

El cable al que están conectadas las antenas se acopla a un transceptor de señal USRP X310 conectado a su vez a un ordenador para procesar los resultados de la detección. A continuación, se adjunta una foto de estos dispositivos.



**Figura 4-16. Transceptor USRP X310 para la recepción de las señales en mediciones reales.**

Como puede verse en la Figura 4-16, existen dos placas idénticas, aunque en este proyecto solo se empleó una de ellas para conectar 3 antenas de vigilancia más la antena de referencia, de tal forma que se puede procesar la información de todas ellas.

Además, otro de los dispositivos empleados es un receptor GPS-DO (GPS Disciplined Oscillator) (Figura 4-17), que permite la sincronización en la captación de estas señales (de referencia y de vigilancia).



**Figura 4-17. Receptor GPS.**

## 5 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA.

### 5.1 Resultados simulados a partir de señales sintéticas.

El script de Matlab proporciona diferentes gráficos que permiten determinar la situación de los contactos. Pudiendo obtener la información Doppler, el TDOA, el FDOA y la distancia biestática, tanto para el caso de simulaciones a partir de señales sintéticas como de medidas reales.

#### 5.1.1 Simulación de detección de un dron en movimiento en tres dimensiones.

Como punto de partida para cualquier ensayo, se puede ubicar el blanco o los blancos en una posición real dentro del escenario, encontrándose situado entre receptor y emisor y a una altura esperada del vuelo de un dron. Además, se puede simular su movimiento en las tres dimensiones, como puede observarse en la Figura 5-1.

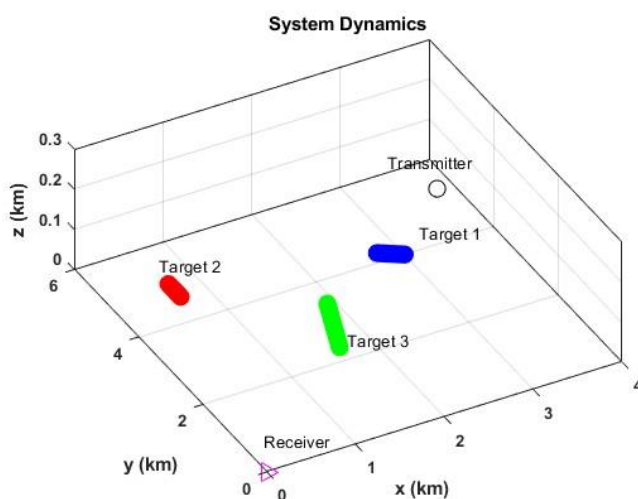


Figura 5-1. Representación contactos en 3D.

#### 5.1.2 Comprobación cambio Doppler al cruzar la línea transmisor-receptor.

Según la posición inicial en la que se encuentre un contacto y su movimiento relativo respecto al receptor y la línea que une transmisor y receptor, puede encontrarse un caso relevante en 2D.

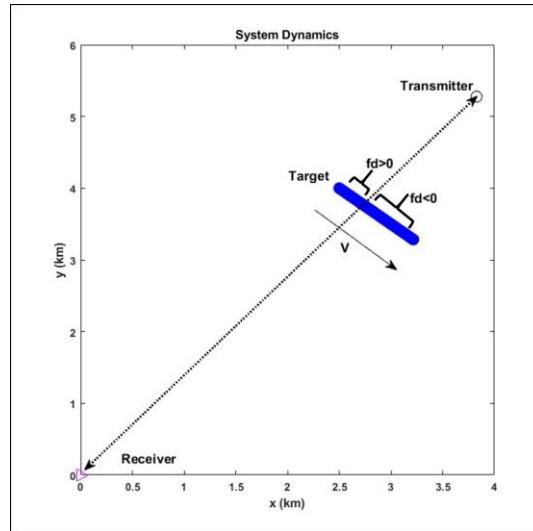


Figura 5-2. Representación del cambio de signo de la frecuencia Doppler.

Aunque el dron se mueve en el eje (x,y,z), con el objetivo de analizar la frecuencia Doppler, en la Figura 5-2 se muestra el dron moviéndose sobre el plano x-y. Según la velocidad y dirección, el dron se acercará o alejará del receptor con mayor o menor rapidez. Esto se verá reflejado en las representaciones del Doppler, FDOA y TDOA.

En el caso expuesto a continuación, inicialmente, la distancia con respecto al receptor se ve aumentada, es decir, se obtendrá un valor de frecuencia Doppler positiva ya que:

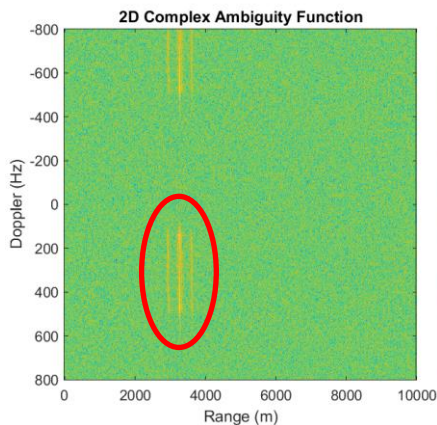
$$f_R > f_o \rightarrow f_D = f_R - f_o > 0$$

siendo:

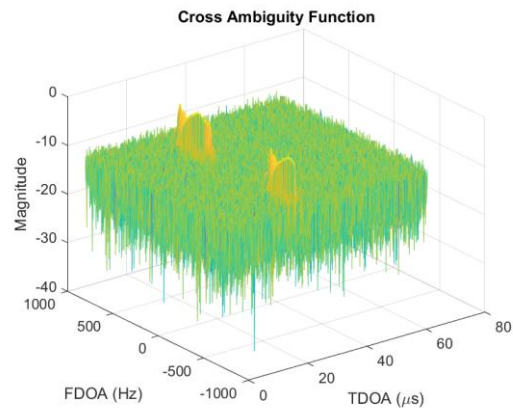
- $f_R$ : la señal recibida una vez rebota en el contacto.
- $f_o$ : la señal emitida.

Cuando se encuentre en la línea, este será el punto en el que el dron se encuentra a la menor distancia posible del receptor, como puede observarse en la Figura 5-2. A partir de este punto, el valor de la frecuencia Doppler comenzará a ser negativo, debido a la separación entre puntos.

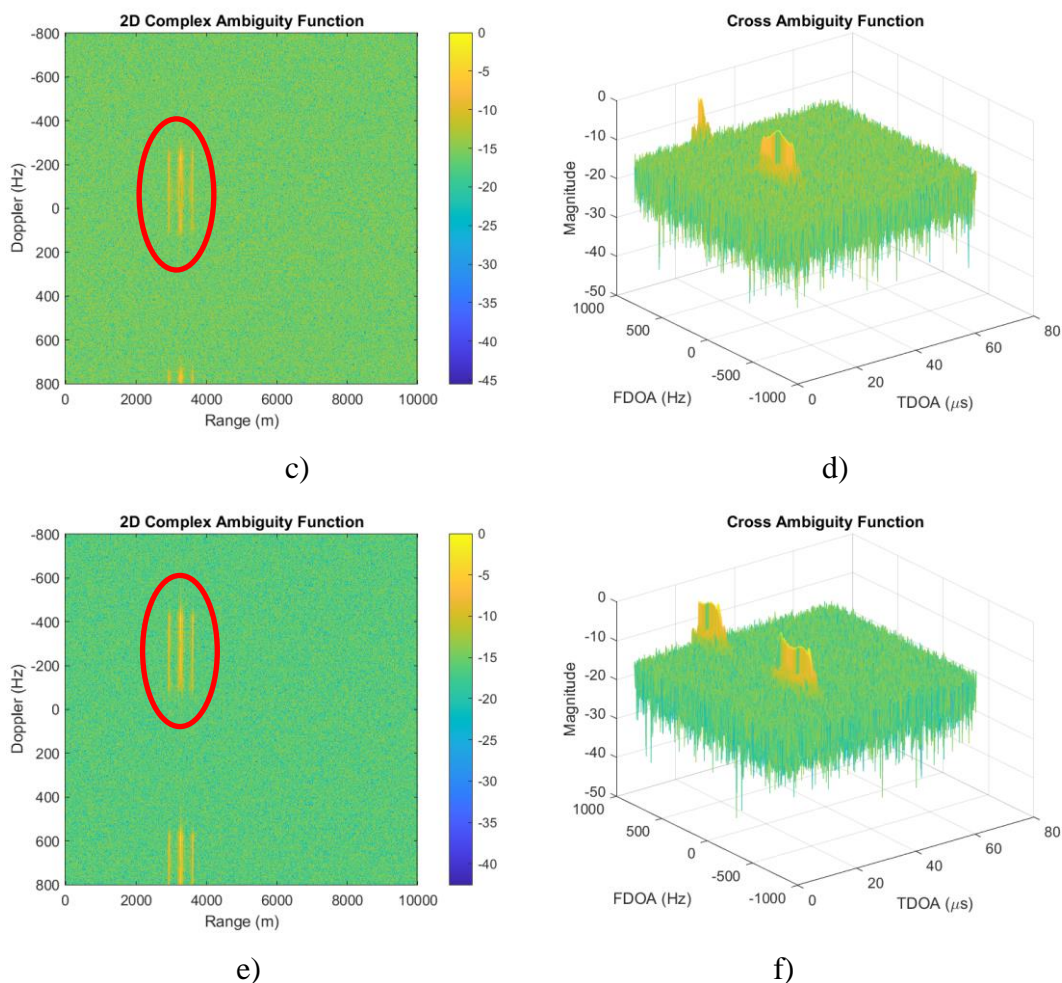
$$f_R < f_o \rightarrow f_D = f_R - f_o < 0$$



a)



b)



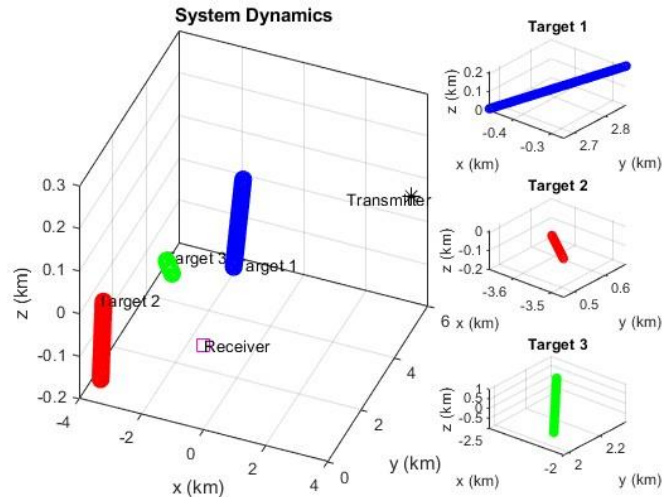
**Figura 5-3. Cambio de signo frecuencia Doppler en contacto atravesando la línea base.**

Las imágenes de la izquierda representan la frecuencia Doppler respecto a la distancia (range) a la que se encuentra el contacto mientras que las de la derecha son una representación (mismo momento que la imagen de la izquierda) teniendo en cuenta tres variables: magnitud del eco (dB), FDOA (Hz) y TDOA ( $\mu s$ ).

En la Figura 5-3, se puede observar que el contacto aparece duplicado en ocasiones. Esto ocurre porque la simulación de la señal que se ha empleado en el código de Matlab posee un PRF, es decir, no es una onda continua; lo que provoca que cada cierto periodo de tiempo vuelva a llegar el eco reflejado en el dron. Además, para ver que el blanco dispuesto se mueve en el tiempo de la simulación, su velocidad es bastante mayor que la que tendría en un caso real, de ahí que haya duplicidad en la detección de blancos.

### 5.1.3 Simulación a partir de señales sintéticas de DVB-T.

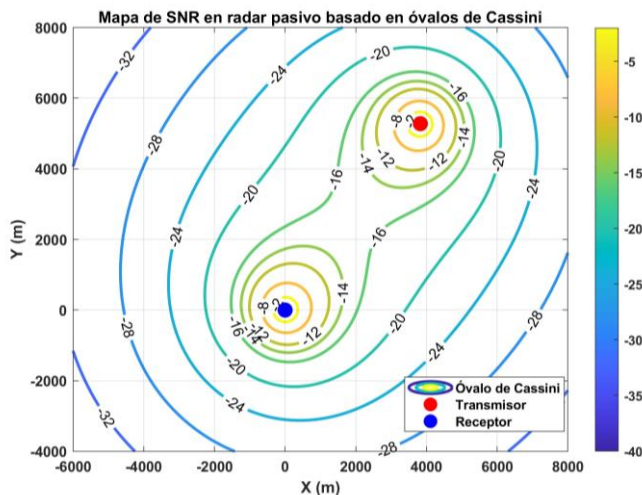
En la representación de los contactos radar en la toma de medidas reales este problema no será tan importante, ya que los transmisores de televisión emiten señales continuas (CW). En la Figura 5-4 se representa la situación del movimiento de los tres contactos simulados, transmisor y receptor de los cuales su detección será estudiada en los apartados 5.1.4 y 5.1.5. En ambos casos se emplea la señal real de televisión recibida (CW).



**Figura 5-4. Representación movimiento tres contactos.**

La explicación por la cual los tres contactos simulados se ven con diferente intensidad/claridad, siendo idénticos, es decir, con el mismo valor de RCS, se basa en los óvalos de Cassini (Figura 5-5) explicados en el apartado 3.2.1.4.

Al encontrarse los contactos a diferentes distancias del receptor y emisor, el óvalo de Cassini en el que se encuentra cada uno de ellos es diferente (ecuación ( 3-10 )), por lo que el valor de SNR (ecuación ( 3-9 )) también varía y la calidad de la detección es distinta.



**Figura 5-5. Óvalos de Cassini del escenario real.**

### 5.1.4 Simulación con contactos de RCS -20 dBsm.

Se representa la detección de tres contactos idénticos con un valor de RCS igual a -20 dBsm, simulando un dron con relativamente gran tamaño o una lancha pequeña. Cada contacto comienza en una posición diferente y realizan distintos movimientos (direcciones y velocidades).

En las figuras de este apartado pueden observarse los tres contactos. En la simulación se tomaron 10 intervalos de medida durante un periodo de 10 segundos, es decir se procesaron CPIs de un segundo. En este apartado se encuentran representadas la primera y la última detección de los blancos, mientras

que en el Anexo V: Resultados Completos de las Simulaciones., se encuentran todas las imágenes disponibles. Viendo el movimiento a lo largo del tiempo, se comprueba que la distancia biestática (m) y el Doppler (Hz) también varían. Corroborando la correcta detección según cambia su localización respecto al emisor y receptor. Esta variación puede comprobarse mejor en las 2D CAF y 2D CFAR.

Al realizar la simulación, también se obtiene el valor de la SNR (dB) con el TDOA y FDOA. La imagen de la izquierda (a) es la misma a la de la derecha (b), una vista en 3D y la otra 2D, siendo más fácil la visualización de los contactos. Así, se observa de forma significativa la diferencia de valor de SNR como consecuencia de la diferente posición de los drones (distinto óvalo de Cassini).

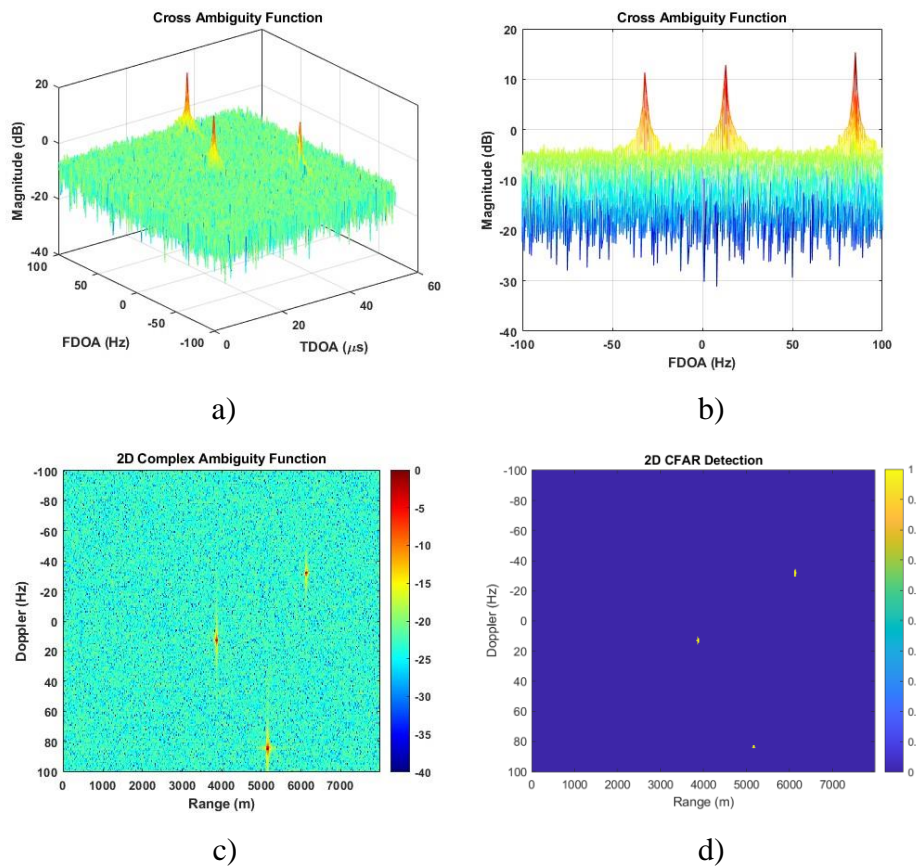


Figura 5-6. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 1$  s).

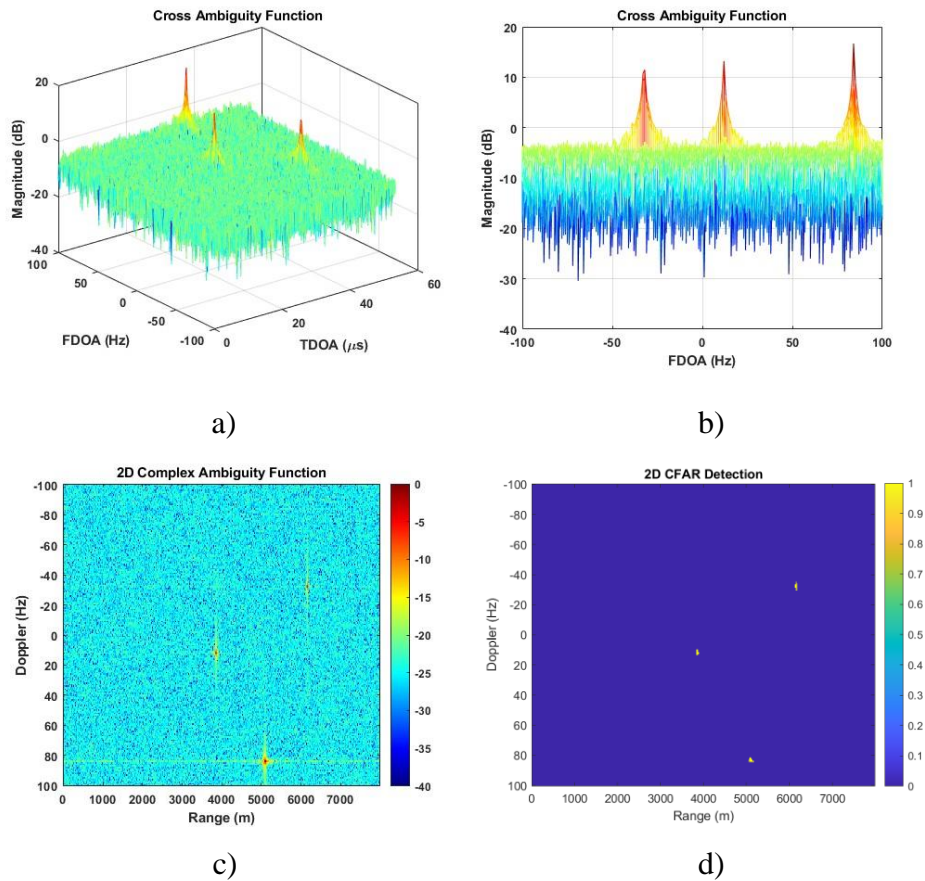


Figura 5-7. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 10$  s).

Por último, cabe destacar que se han representado las tres detecciones realizadas por el radar, lo que corrobora el funcionamiento de éste para blancos similares a drones/lanchas con una RCS aproximada de -20 dBsm. Puede darse el caso en el que se es capaz de distinguir el contacto en las matrices rango-Doppler y RCS-FDOA, encontrando un pico que se encuentra por encima del ruido; pero éste no supere el umbral necesario y, por lo tanto, el radar no sea capaz de detectarlo, no apareciendo representado en la detección CFAR.

### 5.1.5 Simulación con contactos de RCS -30 dBsm.

En las figuras que se encuentran a continuación se representa el escenario de detección de un mini dron (como el empleado en las mediciones reales) con un valor de RCS igual a -30 dBsm. En este caso las muestras se tomaron durante 20 segundos de movimiento, por lo que se tiene una mayor cantidad de matrices.

La primera imagen fue tomada en el primer instante de medición, la del medio a los 10 segundos y la última corresponde a los 20 segundos, de esta manera puede verse el movimiento de los contactos.

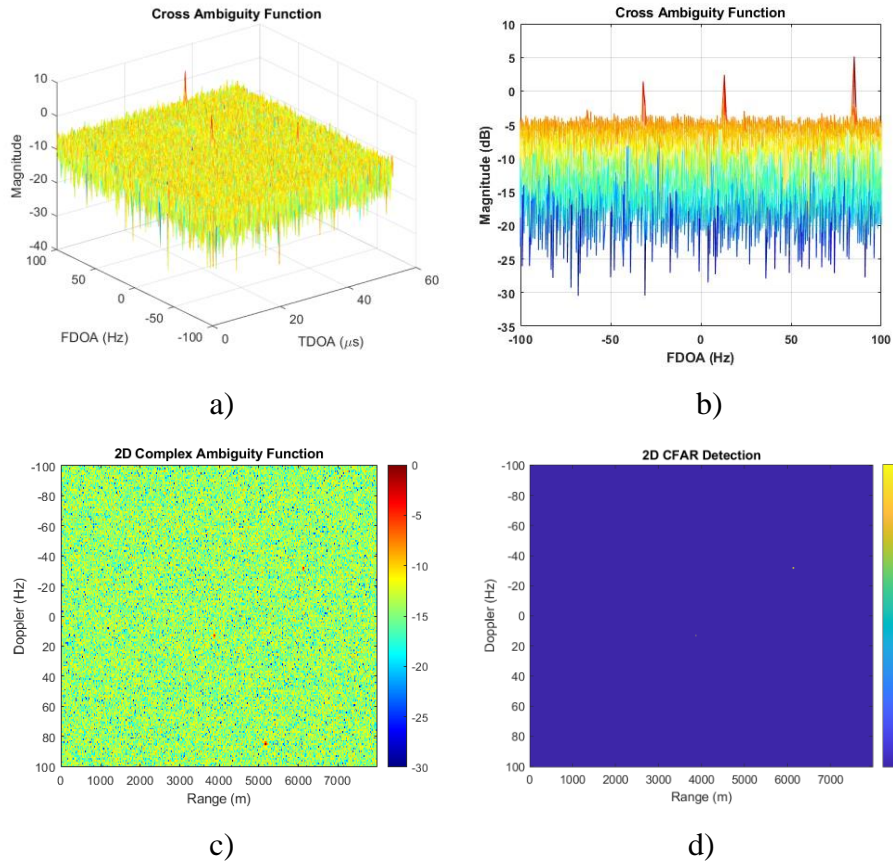


Figura 5-8. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 1$  s).

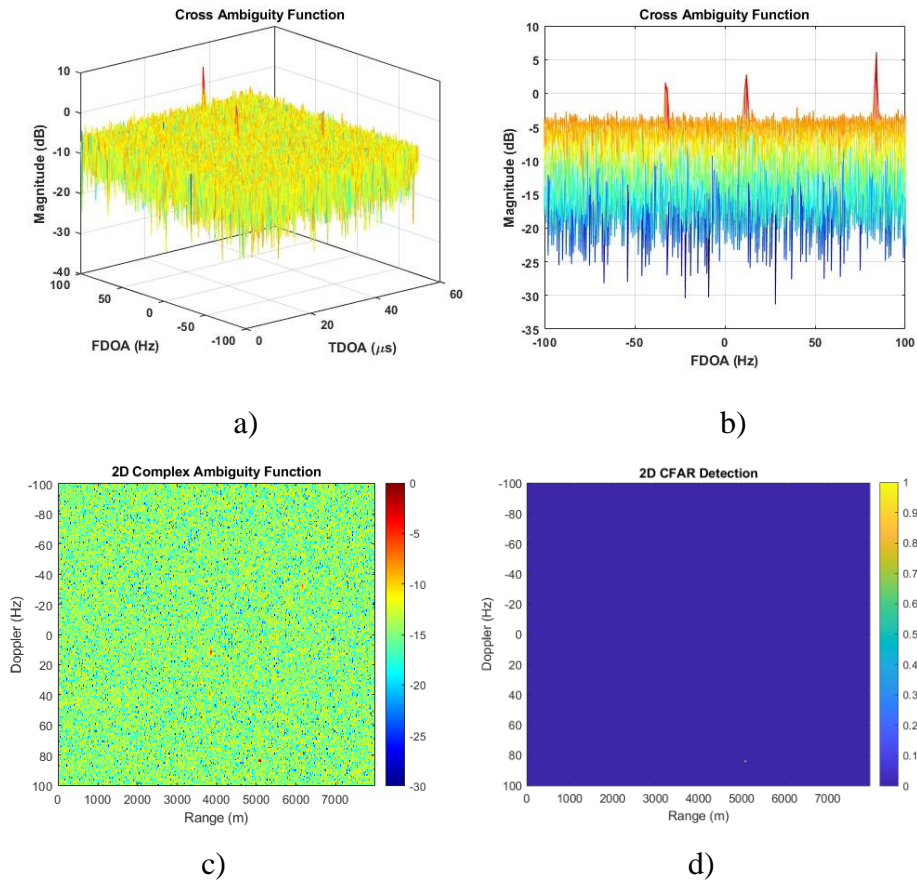


Figura 5-9. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 10$  s).

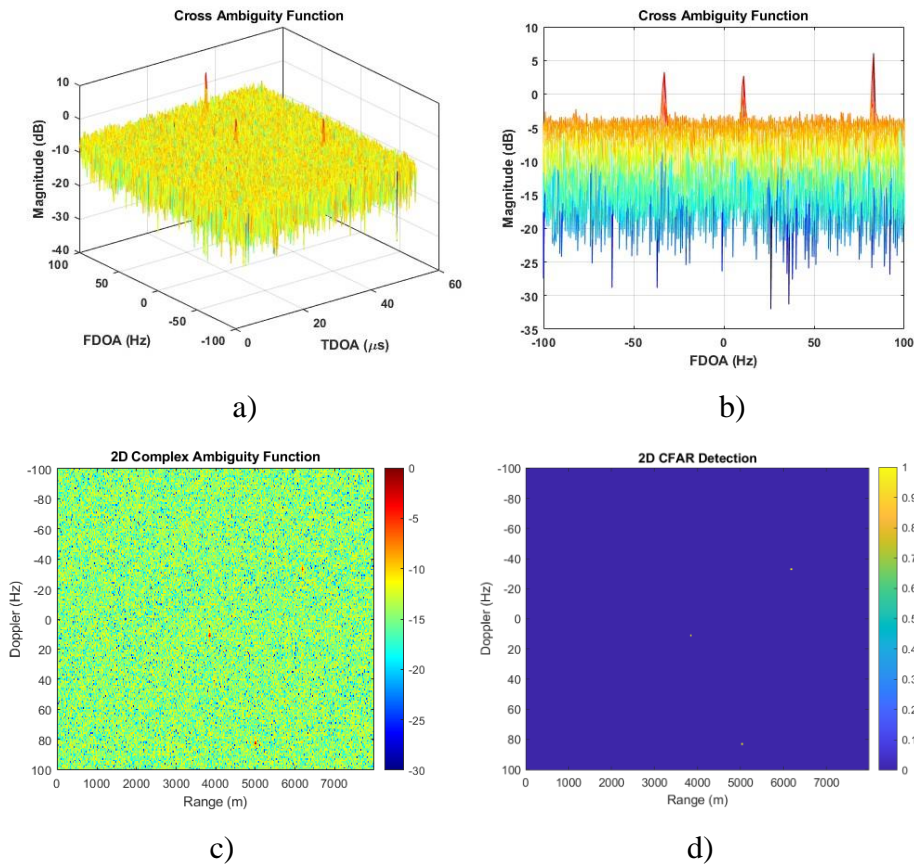


Figura 5-10. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 20$  s).

Cabe destacar que la probabilidad de detección entre el caso anterior (5.1.4) y el actual, en algunos casos disminuye ligeramente, teniendo en cuenta que es un caso simulado. Esto se debe a la diferencia en el eco de la señal reflejada por blancos con diferente RCS. Generalmente, a menor tamaño, menor RCS y, por lo tanto, menor cantidad de señal es reflejada y menor es la probabilidad de detección. Como la simulación se encuentra justo al nivel de ruido, cualquier variación de éste impide la detección correcta del blanco.

## 5.2 Resultados obtenidos a partir de campaña de medidas.

Para demostrar la capacidad de detección de objetos voladores de pequeño tamaño con el radar pasivo, se han llevado a cabo medidas con diferentes drones para, además, ser capaces de estudiar la influencia de la RCS en la detección. Como mencionamos anteriormente, para reducir en lo máximo posible el Clutter el array de antenas estaba apuntando a un ángulo de elevación de  $4^\circ$ . Además, para evitar en la medida de lo posible la navegación del dron sobre el agua el ángulo de demora era de  $260^\circ$  como se puede observar en la Figura 5-11.



Figura 5-11. Dron volando, efectuándose detección.

Las mediciones se han llevado a cabo en condiciones meteorológicas ideales, siendo estas una mínima cantidad de viento y sin precipitaciones. Estas condiciones eran necesarias debido al pequeño motor presente en uno de los drones (HYTOBP S179), no siendo capaz de vencer la fuerza de un viento de alta intensidad. Una vez se comenzaron a realizar las medidas con el dron DJI Mini 4K, el motor del que dispone es mayor, pudiendo volar en sentido opuesto al viento sin suponer ningún inconveniente.

Al principio, se han empleado dos bandas de canales de televisión consecutivas al mismo tiempo, es decir, un ancho de banda de 16 MHz, acorde a lo mostrado en la Figura 4-7. De esta forma, el ancho de banda de la señal es mayor y el valor de la discriminación en distancia disminuye, mejorando su precisión.

Así mismo, al emplear las mayores frecuencias posibles, el valor de la RCS del dron también será el mayor posible con los medios existentes. La siguiente imagen muestra una detección del dron.

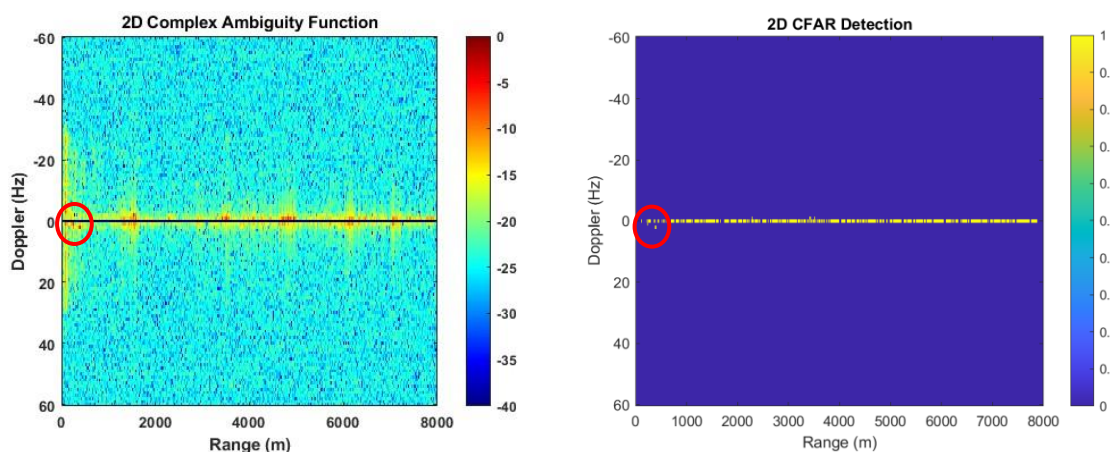


Figura 5-12. Detección dron.

Según la posición en la que el contacto se encuentra realizando su vuelo, detectarlo será más o menos complejo. La RCS del objeto será más elevada cuando se detecten las aspas que hacen volar al dron o cuando la señal se refleje en mayor superficie. Es por esta razón, entre otras, por la cual la capacidad de detección depende de numerosos factores variables en cada medición.

### 5.2.1 Detección de un barco.

A continuación, se observa la detección de un barco de pequeño tamaño, navegando en la Ría de Pontevedra. Esto sirve para comprobar la diferencia del crudo entre el dron empleado y un barco. La

RCS que posee un dron o una lancha de este tipo se encuentra alrededor de 0,01 (-20 dBsm), mientras que un mini dron, como el empleado en las mediciones reales, es del orden de 0,001 (-30 dBsm). En el Anexo V: Resultados Completos de las Simulaciones. puede comprobarse la variación de los resultados obtenidos en las simulaciones de contactos con un valor de RCS similar (-30 dBsm).

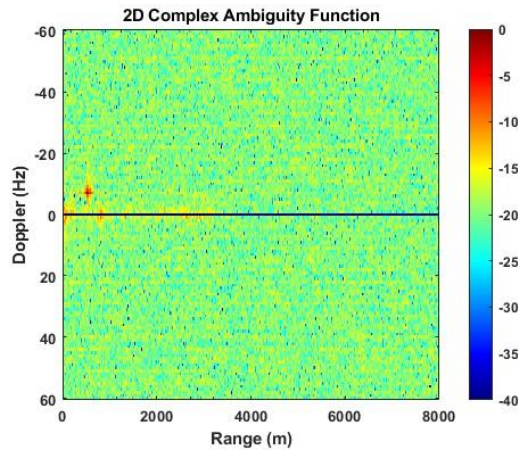


Figura 5-13. Detección lancha en la Ría de Pontevedra, RCS aproximada de -20 dBsm.

### 5.2.2 Detección de un mini dron.

En los siguientes apartados de esta sección se observan detecciones de los drones en distintas situaciones, variando datos que afectan en la posibilidad y correcta localización.

#### 5.2.2.1 Detección dron mayores dimensiones y velocidad.

En la imagen de este apartado se encuentra la detección de un dron de tamaño ligeramente superior a los empleados en el resto de las mediciones moviéndose a una velocidad también superior (Doppler de mayor valor absoluto). Como curiosidad, puede observarse que el ruido que debería encontrarse a distancia cero, está ligeramente desplazado en el eje horizontal de la línea. Esto se debe a que, al intentar detectar blancos a distancias muy cercanas al radar, cualquier pequeño error en la estima de la posición del transmisor, receptor o blanco, aparece reflejado en el mapa Doppler, lo cual no sucede cuando se tratan de detectar blancos a distancias suficientemente alejadas.

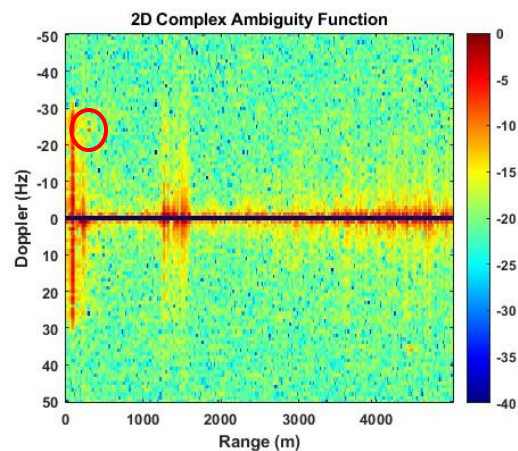


Figura 5-14. Detección dron mayores dimensiones.

### 5.2.2.2 Detección de blanco usando un ancho de banda de 16 MHz.

En este caso el dron detectado fue uno de los dos explicados anteriormente, realizándose varias medidas. En la Figura 5-15 se encuentra la primera de las detecciones. Para la siguiente medición se aumentó el ancho de banda de 8 a 16 MHz con el objetivo de mejorar la calidad de la detección, el resultado de la ecuación ( 4-1 ) y, por lo tanto, la discriminación en distancia del radar.

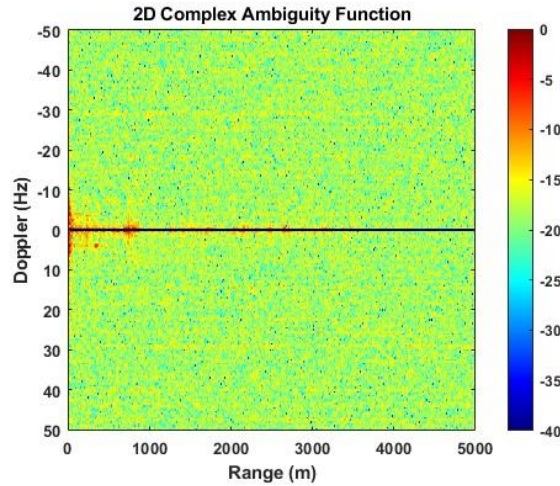


Figura 5-15. Detección dron con ancho de banda duplicado.

### 5.2.2.3 Análisis detección variando el valor del $T_{CPI}$ .

Con el objetivo de analizar el comportamiento de la longitud del CPI, se analiza cómo varía la SNR en función del tiempo de integración de los datos a partir de un experimento donde se detecta el dron muy cerca del Doppler cero.

Las siguientes series de detecciones fueron realizadas aumentando el tiempo de CPI de tal forma que disminuye (mejora) la resolución en frecuencia  $\Delta v$  dada por la ecuación ( 4-2 ), mejorando la discriminación en velocidad del radar. Se emplearon  $T_{CPI}$  de uno, dos, tres y seis segundos, corroborando la mejora en la detección (elevada SNR) a medida que aumenta el valor del intervalo de procesamiento coherente.

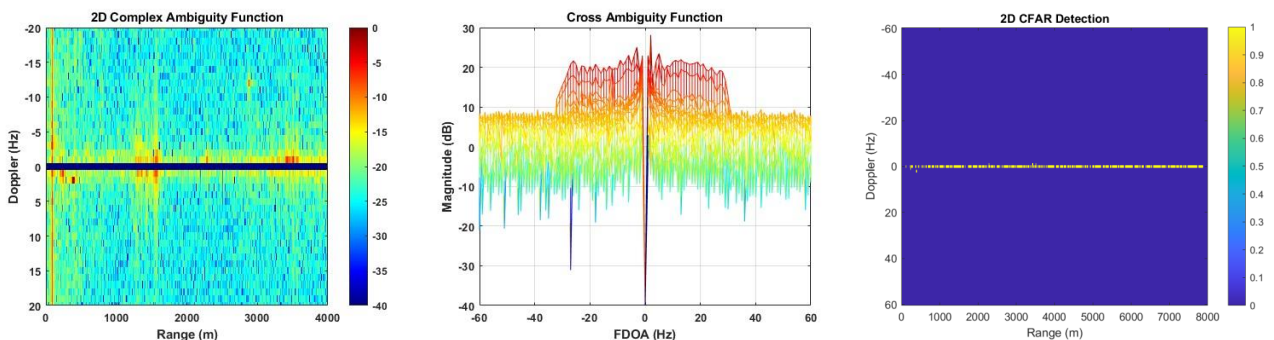


Figura 5-16. Detección dron con CPI un segundo.

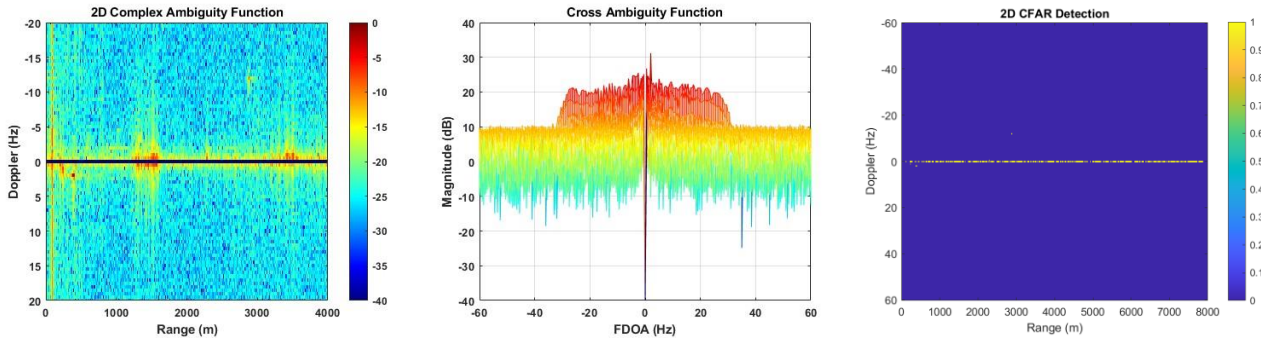


Figura 5-17. Detección dron con CPI dos segundos.

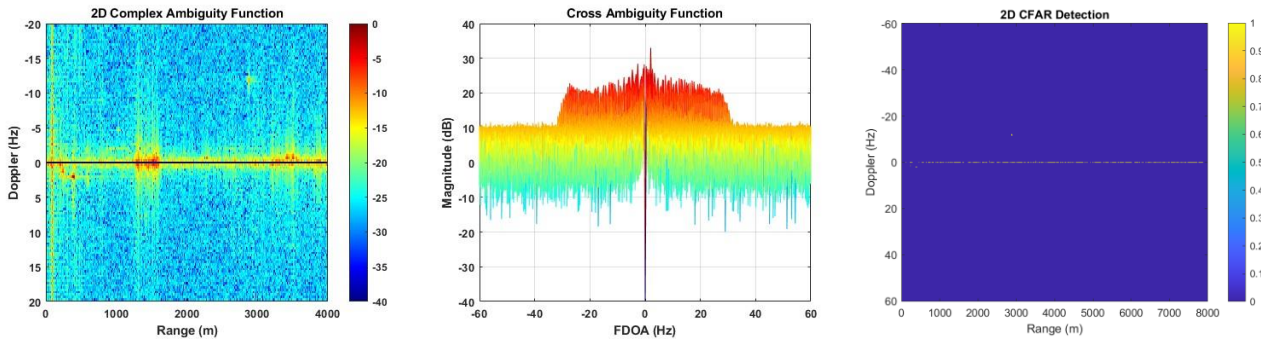


Figura 5-18. Detección dron con CPI tres segundos.

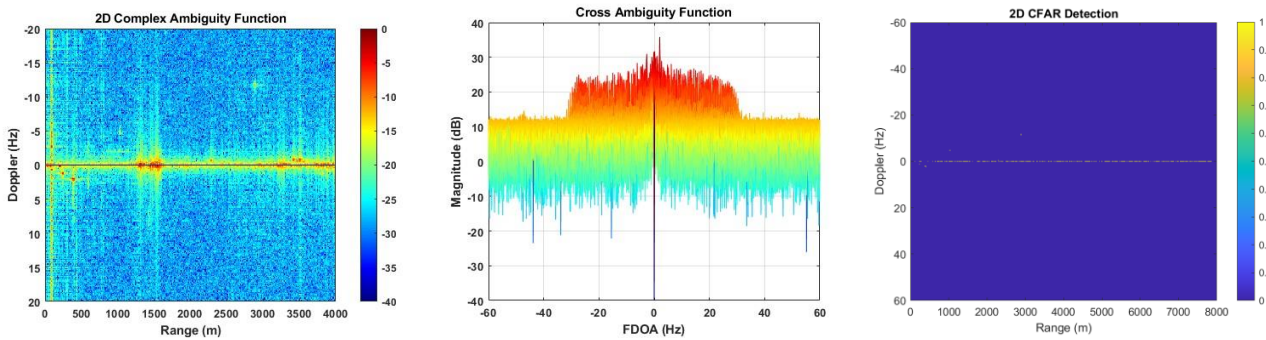


Figura 5-19. Detección dron con CPI seis segundos.

En el Anexo VI: Resultados Medidas Reales. están recogidos todos los resultados obtenidos con los diferentes CPIs. Además, en la Tabla 5-1 puede verse corroborado ya que el valor de la SNR, es decir, la diferencia entre la señal y el ruido es mayor a medida que el intervalo aumenta.

		CPI (s)			
		1	2	3	4
SNR (dB)		23,18	24,55	25,50	26,80
		23,38			
		23,68	24,68		
		23,12			
		23,32	24,40	25,17	
		23,22			

Tabla 5-1. Variación de la SNR en función del CPI.

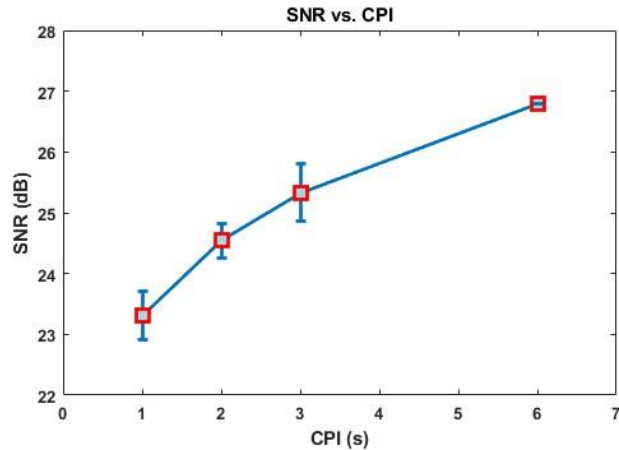


Figura 5-20. Variación de la SNR en función del CPI.

A medida que se tiene un intervalo de más segundos, se tienen menos valores de SNR ya que se tiene una medición de la detección de una duración de seis segundos. Si el intervalo es de un segundo, se obtendrán seis imágenes. Cuando dura dos segundos, se tienen tres. Y así sucesivamente hasta que con un intervalo de duración de cuatro segundos solo puede obtenerse una, es decir, se pierde la información del final de la medición ya que no hay datos para realizar una segunda imagen completa.

#### 5.2.2.4 Detección empleando cuatro canales de televisión de mayor frecuencia.

Durante los últimos días de mediciones para obtener un mayor número de detecciones del dron se observó la presencia de cuatro canales de televisión consecutivos, los cuales se encuentran representados en la Figura 4-8 y Figura 4-9. Al aumentar todavía más el ancho de banda (cumpliendo uno de los criterios para mejorar la precisión del radar) y la frecuencia media de estos cuatro canales (678 MHz), mejora tanto la discriminación en distancia como la RCS del contacto.

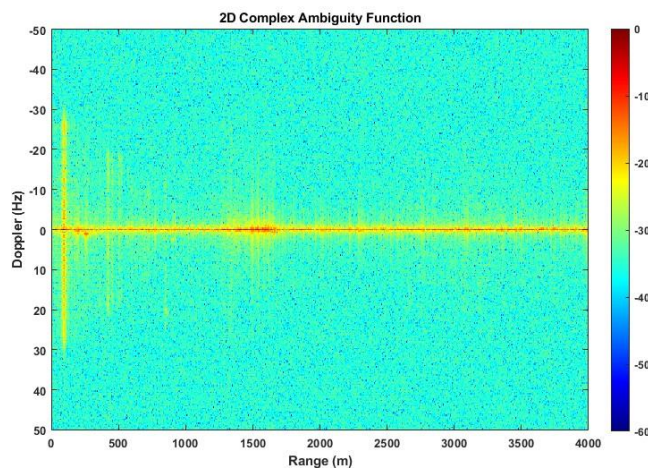


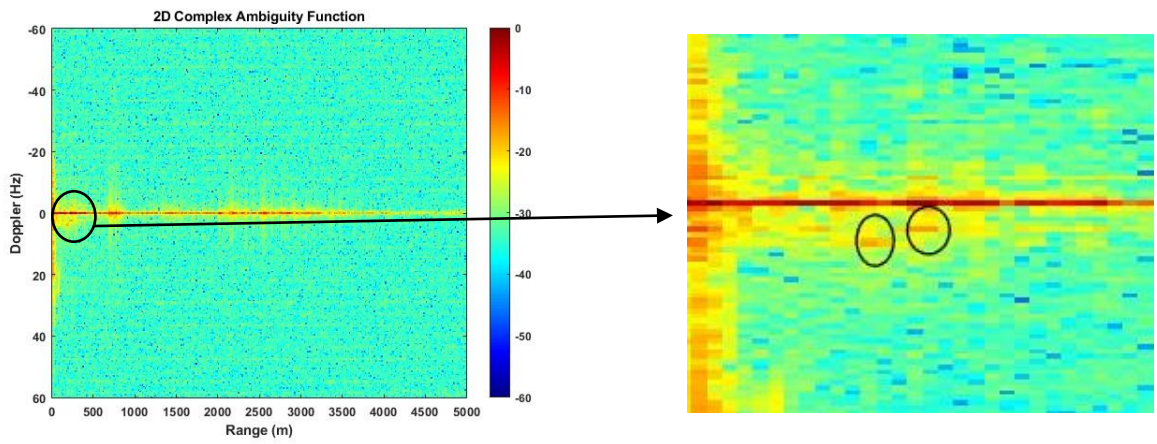
Figura 5-21. Detección del dron usando un ancho de banda de 32 MHz.

#### 5.2.3 Detección de dos mini drones simultáneamente.

Una vez localizado el dron en los casos anteriormente mencionados, se llevó a cabo una detección mientras volaban dos drones de manera simultánea. De esta manera, se podía comprobar la capacidad de discriminación en distancia y corroborar si el radar empleado era capaz de detectarlos de forma correcta, representando los dos contactos en las imágenes (Figura 5-22, drones volando para realizar la detección y Figura 5-23, representación de los resultados en dos días diferentes).

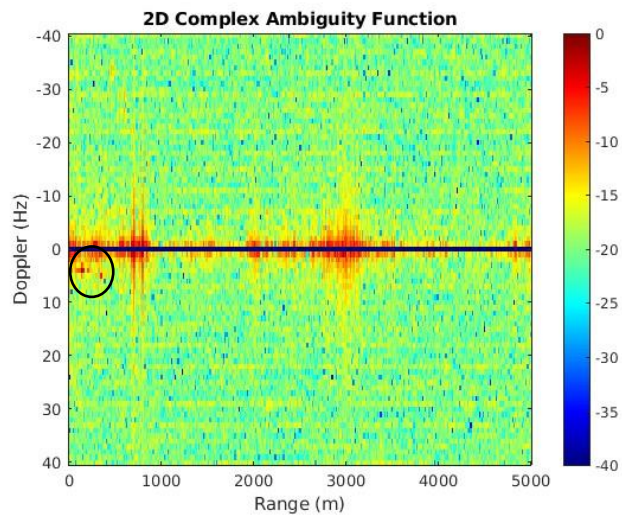


Figura 5-22. Fotos volando dos drones.



a)

b)



c)

Figura 5-23. Detección dos drones simultáneamente en dos medidas diferentes.

### 5.2.4 Representación en un mapa de coordenadas

Por último, con el objetivo de poder posicionar el dron sobre un mapa de coordenadas, en este apartado se han utilizado tres antenas del array para detectar en primer lugar el blanco y después poder determinar el DoA. En la Figura 5-24 se muestra el mapa rango-Doppler individual de cada una de las antenas de vigilancia para un CPI determinado donde se puede detectar el dron.

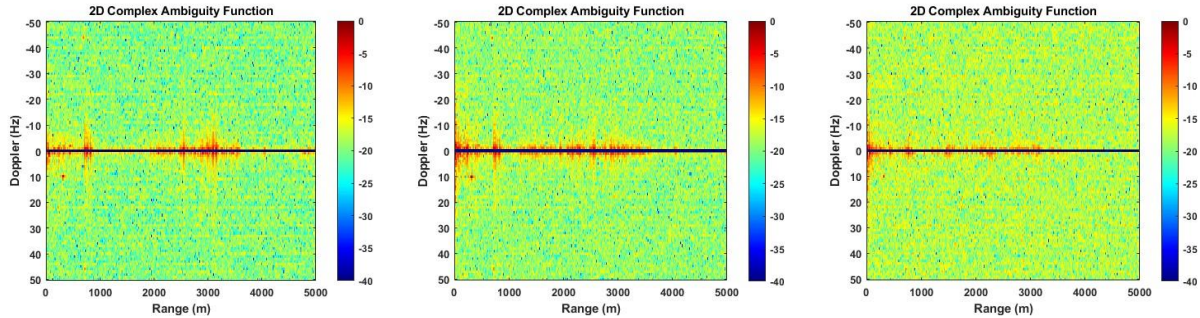
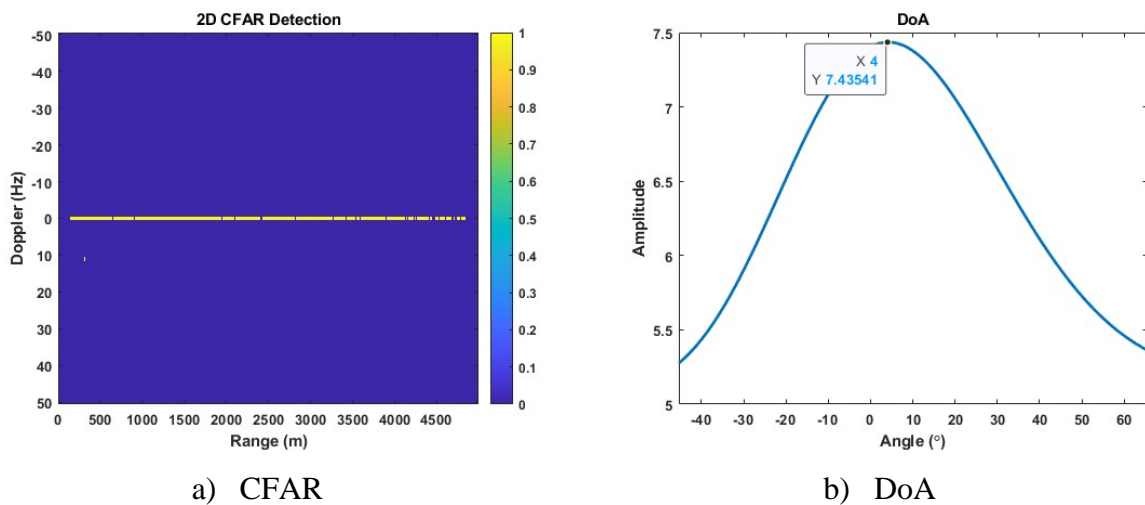


Figura 5-24. Mapa rango-Doppler de cada una de las antenas del array.

Empleando las técnicas de beamforming y el CFAR desarrolladas en [20] se ha conseguido detectar el blanco a una distancia biestática de 315 metros, a un Doppler de 11 Hz y a una demora de  $4^\circ$  respecto a la dirección de apuntamiento del array (es decir, la demora estimada fue de  $264^\circ$ ) para el mismo CPI de la figura anterior, como se muestra en la Figura 5-25. Cabe destacar que no se realizó la calibración sobre el array de antenas.



a) CFAR

b) DoA

Figura 5-25. Detección del dron con el array.

Con los parámetros estimados en el paso anterior y considerando 10 CPIs consecutivos de un segundo de duración, se puede posicionar el blanco en un mapa de coordenadas según [18], como se muestra en la Figura 5-26. Analizando esta figura se puede observar que en alguno de los CPIs el algoritmo de la CFAR no consiguió detectar el blanco debido a que el nivel de SNR en algunos de esos CPIs era insuficiente. Incluso en una de las detecciones el ángulo estimado no fue el correcto. Es de esperar que si se hiciese la calibración del array según [19] la precisión en las estimas mejoraría.



**Figura 5-26. Posicionamiento de las detecciones en un mapa.**

## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

En este apartado se realiza un resumen de los resultados del trabajo, analizando uno a uno los objetivos propuestos inicialmente además de desarrollar objetivos adicionales que también han sido alcanzados. Por último, se describen posibles líneas futuras de investigación y desarrollo.

### 6.1 Conclusiones de los objetivos iniciales.

El objetivo principal de este TFG era la detección de UAVs que como se puede comprobar en los resultados mostrados en el capítulo anterior se ha conseguido realizar teniendo en cuenta además que las pruebas fueron realizadas usando mini drones en vez de drones de tamaño superior como en un principio estaba planificado.

A lo largo de los diferentes apartados del trabajo, tanto en las simulaciones a partir de señales sintéticas como a partir de las mediciones reales, se ha comprobado la posibilidad de detectar mini drones mediante radar pasivo basado en señales DVB-T, aunque el pequeño valor de la RCS del dron disminuye la probabilidad de la correcta detección.

Respecto a los objetivos secundarios definidos en la introducción se ha estimado la RCS que genera un mini dron a partir de un modelo en 3D importado en formato .STL. A mayores, se ha estimado que cuanto mayor sea la frecuencia utilizada para la detección, mayor va a ser la RCS del blanco. Todo ello unido al espectro existente actualmente de DVB-T en el entorno del radar nos ha permitido seleccionar cuál sería la frecuencia de detección óptima que genera la mayor RCS posible.

Una vez definido cuál es el mejor canal de frecuencia del IO, el siguiente objetivo era determinar cuál es la mejor configuración de los parámetros radar que permiten maximizar la probabilidad de detección de un dron. En este caso, la resolución en distancia  $\Delta R$  y la resolución Doppler  $\Delta v$ . Para aumentar la resolución en distancia se mostró que la solución óptima es usar el mayor ancho de banda posible que inicialmente fue fijado a 16 MHz y después ampliado a 32 MHz. Respecto a la resolución Doppler, se demostró que cuanto mayor sea el tiempo de integración de los datos y el blanco no se desplace a mucha velocidad, mayor será la SNR y con ello, mayor será la probabilidad de detección, como se resume en la Tabla 6-1.

Parámetro						
CPI (s)				B (MHz)		
1	2	3	6	8	16	32

Tabla 6-1. Parametrización para maximizar la resolución en distancia y Doppler.

A lo largo del trabajo se ha comprobado que la detección de mini drones con RCS reducida es posible, aun así, cabe destacar que la distancia máxima a la que se puede realizar la detección es limitada. Es de esperar que en drones de tamaño ligeramente superior la distancia de detección aumentaría considerablemente.

Aunque la señal recibida en cada una de las antenas del array fue grabada para estimar el DoA, cabe la mejora de utilizar técnicas de beamforming para sumar coherentemente todas las señales aumentando la SNR conjunta y con ello la probabilidad de detección.

Dentro de las limitaciones encontradas, en el caso de las detecciones a distancias muy cercanas a la posición del receptor, el posible error en el posicionamiento de transmisor, radar y blanco derivó en detecciones del dron a distancias negativas, dificultando la correcta representación.

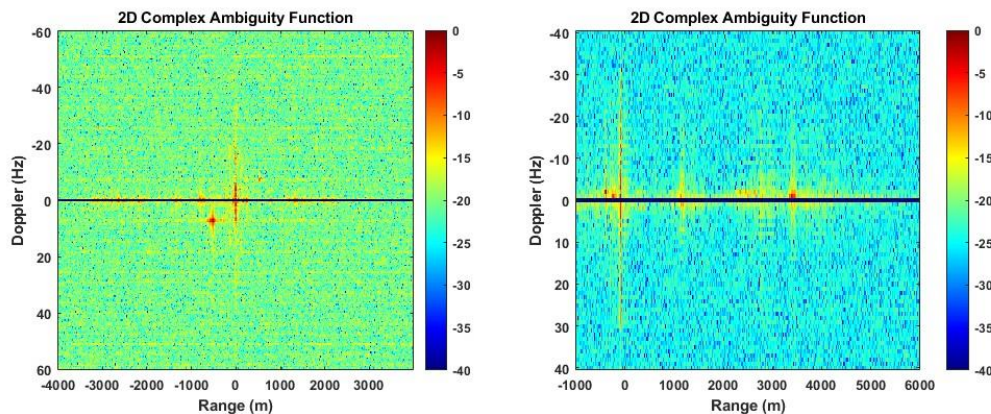


Figura 6-1. Detección contacto a distancia negativa.

En un escenario real, como puede ser en un conflicto armado, la detección de drones mediante radar pasivo empleando señales de DVB-T sería viable. Dentro de los objetivos se consideraba una detección con suficiente antelación y a una distancia adecuada para que sea útil en el ámbito militar. Respecto a la distancia, aun teniendo en cuenta que la distancia biestática de detección para el mini dron no es excesiva, debe tenerse en cuenta que el receptor radar no se posicionará en el centro de las instalaciones, sino a una distancia del objetivo a defender, ganando distancia en la detección y evitando el ataque del enemigo llevando a cabo medidas antidrones. Cuando se menciona una detección con suficiente antelación, el umbral máximo es la detección en tiempo real. Aunque en este trabajo no se maximizó este parámetro, ya que las señales son grabadas en GNU radio y después procesadas en Matlab, es de esperar que todo este procesado se pueda obtener, si no en tiempo real, muy próximo a éste.

## 6.2 Líneas futuras.

El presente trabajo se considera un primer estudio para comprobar la capacidad de detectar de forma correcta y con antelación suficiente los mini drones, actualmente empleados en conflictos armados de especial relevancia. Para ello se ha empleado una antena receptora (referencia) para captar la señal directa proveniente del IO y el array de antenas (vigilancia) para captar la señal reflejada en el contacto.

Como se mencionó en las conclusiones, la utilización de técnicas de beamforming para sumar coherentemente las señales captadas por la antena de vigilancia permitiría aumentar la SNR en el mapa rango-Doppler y con ello, la probabilidad de detección o, dicho de otra forma, permitiría detectar el mismo blanco a mayor distancia. Para aumentar la precisión tanto en la estima del DoA como en las técnicas de beamforming sería necesario calibrar adecuadamente el array [19].

En este trabajo se consideró la altura correcta donde está emplazado el IO y también que el dron se podía mover libremente en las tres dimensiones. Sin embargo, para un correcto emplazamiento sobre un mapa de coordenadas sería necesario determinar no la elipse, si no el elipsoide donde se puede localizar el contacto y determinar el DoA, no solo en demora, sino también en elevación para un correcto emplazamiento en 3D.

Relacionado con la RCS del blanco se considera que el Toolbox de Pofacets permite un análisis en mayor profundidad de los diferentes tipos de materiales de los que puede estar fabricado un dron y que permitirían variar el eco reflejado.

Uno de los principales problemas en radar pasivo es la señal directa del IO que se recibe en las antenas de vigilancia, empeorando los resultados de la correlación que generan el mapa rango-Doppler y con ello, disminuyendo la probabilidad de detección de los blancos en general. Para ello, existen diversas técnicas de filtrado de este rayo directo y de todos aquellos blancos con Doppler cero para eliminarlos del mapa rango-Doppler, la más conocida el algoritmo extensivo de cancelación de ecos (Extensive Cancellation Algorithm, ECA) [73]. Este algoritmo requiere un coste computacional muy alto, mucho más todavía cuando se usan anchos de banda más grandes de lo habitual, por lo que en este trabajo el cero Doppler se filtró directamente sin aplicar el ECA. Evidentemente, la utilización de estos filtros mejoraría la relación señal a ruido del dron y se considera que debería ser utilizado en el futuro.

## 7 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] AESA, «España supera los 119.000 operadores de drones registrados en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA)». Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es>
- [2] C. Calvo, «La tecnología en los conflictos actuales», *Global Affairs Journal*, n.º 6, p. 8, ene. 2024.
- [3] BBC News Mundo, «El crucial rol de los drones en la guerra de Ucrania (y quiénes los suministran)». Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-62279288>
- [4] NATO, «Detection, Tracking, ID and Defeat of Small UAVs in Complex Environments», en *Meeting Proceedings RDP*, NATO, ene. 2024. doi: 10.14339/STO-MP-SET-315.
- [5] NATO, «Drone Detectability: Modelling the Relevant Signature», en *Meeting Proceedings RDP*, NATO, jul. 2021. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [6] NATO, «Science & Technology Organization. Empowering NATO's Technological Edge», NATO. Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://lc.cx/LdYilC>
- [7] M. Nilsen et al., «Machine Learning Empowered Radio Frequency Signal Classification for UAS Detection», en *STO-MP-MSG-SET-183*, 2021, p. 16. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [8] Khan Academy, «La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- [9] T. R. Pérez, «Estudio general sobre el estado del arte de sensores ópticos e infrarrojos y su aplicación en vehículos aéreos no tripulados», *Escuela Naval de Cadetes «Almirante Padilla»*, n.º 6. p. 114, diciembre de 2012. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistasescuelanaval.com/derrotero>
- [10] M. Á. Pardo, «El radar pasivo, la capacidad de detectar sin dejar rastro», en *Revista General de Marina*, nov. 2023, p. 14. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.defensa.gob.es/BVMDefensa/es/inicio/inicio.do>
- [11] J. M. Núñez-Ortuño et al., «Beamforming Techniques for Passive Radar: An Overview», *Sensors*, vol. 23, n.º 7, p. 3435, mar. 2023, doi: 10.3390/s23073435.
- [12] D. Tejera et al., «Acoustic localization of UAVs with microphone arrays. Comparison of different array geometries.», en *Universidad De Alcalá*, 2023, p. 6. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Cuenca23/Abs\\_167.pdf](https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Cuenca23/Abs_167.pdf)
- [13] D. Tejera, «Análisis de señales acústicas para la detección de UAVs». Universidad De Alcalá, 2021. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10017/49529>
- [14] UAV Latam, «¿Qué es un sensor LiDAR y cómo funciona?» Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://uavlatam.com/que-es-un-sensor-lidar-como-funciona/>

- [15] IBM, «¿Qué es LiDAR?» Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/lidar>
- [16] PNOA, «Aspectos técnicos del proyecto-LiDAR», Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/tecnologia-lidar>
- [17] C-UAS Hub, «Sistema de detección y seguimiento de drones: enfoques de sensores fusionados». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cuashub.com/es/contenido/sistema-de-deteccion-y-seguimiento-de-drones-enfoques-de-sensores-fusionados/>
- [18] R. Samaniego Ferrero, «Determinación de la posición de blancos marítimos en radar pasivo a partir de técnicas de beamforming». 30 de abril de 2023. Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/711>
- [19] J. Calvo, «Calibración de un array de antenas para beamforming en radar pasivo». 30 de abril de 2024. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/776>
- [20] *Análisis de configuraciones MIMO para la mejora de las prestaciones de RAdares PAsivos con aplicación al ámbito MARítimo (MIRAPAMAR)*. (2021). Proyecto PICUD-2021-06, Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible en: <https://cud.uvigo.es/proyectos-internos/>
- [21] I. García, «Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones». Universidad de Valladolid, marzo de 2017. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/23021>
- [22] G. Dekoulis, «Launch of a DH.82 Queen Bee (mother of drones) target drone (1941).», ResearchGate. Accedido: 25 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/Launch-of-a-DH82-Queen-Bee-mother-of-drones-target-drone-1941\\_fig1\\_326050429](https://www.researchgate.net/figure/Launch-of-a-DH82-Queen-Bee-mother-of-drones-target-drone-1941_fig1_326050429)
- [23] V. M. Puente, «El impacto de los drones en los conflictos bélicos internacionales. Breve análisis del Derecho Internacional Humanitario, a través del Estado del Arte», Relaciones Internacionales, El Colegio de San Luis, 2020. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://colsan.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1013/1648>
- [24] J. D. Blom, «Unmanned Aerial Systems: A Historical Perspective», Combat Studies Institute Press. US Army Combined Arms Center, 2010, p. 153. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://usacac.army.mil/>
- [25] M. Alexándrova, «Así era el dron supersónico soviético de espionaje Tu-123 Yástreb creado en los años 60», Russia Beyond. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.rbth.com/tecnologias/85243-dron-supersonico-sovietico-espionaje-tu-123-yastreb>
- [26] Naval History and Heritage Command, «Navy's Use of Unmanned Aerial Vehicles». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.history.navy.mil/browse-by-topic/exploration-and-innovation/unmanned-aerial-vehicles.html>
- [27] J. M. Andujar, «Sistemas Aéreos Pilotados de forma Remota (RPAS): Historia, Sistemas y Operaciones», Universidad de Huelva, 2016. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net>
- [28] M. Haluani, «La Tecnología Aviónica Militar en los Conflictos Asimétricos: Historia, Tipos y Funciones de los Drones Letales». mayo de 2014. Accedido: 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://11nq.com/4XZ7L>
- [29] R. Ocón, «Predator B en España», Dron Guru. Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.droneguru.es/drones-predator-en-cielo-espanol/>
- [30] Aeronaves Militares Españolas, «MQ-9 PREDATOR B». Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/mq-9-predator/>
- [31] F. J. Chao, «MQ-9 PREDATOR B», Aeronaves militares españolas. Accedido: 25 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/mq-9-predator/>

- [32] Digital Combat Simulator, «RQ-4 Global Hawk (AI only)». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.digitalcombatsimulator.com/es/files/3331847/>
- [33] J. Renau, «Clasificación UAV según la OTAN», Ápeiron UAV. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://proyectoapeiron.wordpress.com/2014/02/11/clasificacion-uav-segun-la-otan/>
- [34] R. A. Padilla, «Aplicaciones de drones en aeropuertos: seguridad, inspección y otros», Segurilatam. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.segurilatam.com/seguridad-por-sectores/puertos-y-aeropuertos/aplicaciones-de-drones-en-aeropuertos-seguridad-inspeccion-y-otros\\_20230406.html](https://www.segurilatam.com/seguridad-por-sectores/puertos-y-aeropuertos/aplicaciones-de-drones-en-aeropuertos-seguridad-inspeccion-y-otros_20230406.html)
- [35] AESA, «Marco regulatorio para operaciones con drones», sep. 2017, p. 86. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/images/gl/marco-regulatorio-para-operaciones-con-drones\\_tcm37-431971.pdf](https://www.mapa.gob.es/images/gl/marco-regulatorio-para-operaciones-con-drones_tcm37-431971.pdf)
- [36] A. O. Jácome, «Estudio de la Configuración Estructural de los Materiales Compuestos Sintéticos Estratificados de Matriz Epoxi y su Influencia en las Propiedades Mecánicas del Fuselaje de los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) del Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (CIDFAE)», Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica-Universidad de Ambato (Ecuador), 2015. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec>
- [37] S. Armendáriz, «Vehículos aéreos no tripulados». Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-Unidad Profesional Ticomán-Ingeniería Aeronáutica, 12 de febrero de 2014. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13734/1994%202014%281%29.pdf?sequence=1>
- [38] Ó. O. López, «Diseño, análisis y optimización de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) con materiales compuestos», Instituto Tecnológico de Chihuahua (México)-División de Estudios de Posgrado e Investigación, 2018. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://posgradoitch.mx/wp-content/uploads/2022/10/GEN2016\\_1\\_GR062018\\_LOPEZ-ONTIVEROS-OSCAR-OMAR.pdf](https://posgradoitch.mx/wp-content/uploads/2022/10/GEN2016_1_GR062018_LOPEZ-ONTIVEROS-OSCAR-OMAR.pdf)
- [39] G. Cirilo, «Análisis estructural de un dron de competición», Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño-Universitat Politècnica de València, jul. 2023. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/196364>
- [40] J. E. Arango y G. Camargo, «Fabricación de chasis de vehículos aéreos no tripulados que garanticen los estándares de peso con base al dron SYMA X8W QUADCOPTER con procesos manuales y materiales de la Región», *Revista INNOCAE 2019-SENA (Colombia)*, vol. 3, n.º 1. p. 6, 2019. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.sena.edu.co/index.php/innocae/article/view/3357>
- [41] CNN, «Así ha sido la guerra en Ucrania: datos y cronología sobre la invasión rusa, un año después». Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cnnespanol.cnn.com/2023/02/23/guerra-ucrania-cronologia-orix>
- [42] K. Chávez, «Learning on the Fly: Drones in the Russian-Ukrainian War», *Arms Control Association*, vol. Tomo 53, n.º 1, ene. 2023, Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/2085c57e92f8e53792724dfe4052a10d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=37049>
- [43] I. González, «Así es el Orlan-10, el dron de espionaje ruso que Ucrania fulmina con extrema facilidad», *El Español*. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20220419/orlan-10-dron-espionaje-ucrania-fulmina-extrema-facilidad/665683450\\_0.html](https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20220419/orlan-10-dron-espionaje-ucrania-fulmina-extrema-facilidad/665683450_0.html)
- [44] R. González, «Así es el Shahed-136, el ‘dron suicida’ utilizado por Irán contra Israel: ¿cuál es su alcance?», *AS*. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://as.com/actualidad/sociedad/asi-es-el-shahed-136-el-dron-suicida-utilizado-por-iran-contra-israel-cual-es-su-alcance-n/>

- [45] A. Borghgraef et al., «SET-260: A Measurement Campaign for EO/IR Signatures of UAVs», en *STO-MP-MSG-SET-183*, NATO, 2021, p. 22. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [46] J. A. López-Salcedo, «Sistemas Radar». Universitat Oberta de Catalunya. Accedido: 18 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/77345/1/Sistemas%20de%20radionavegaci%C3%B3n\\_M%C3%B3dulo%202\\_Sistemas%20radar.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/77345/1/Sistemas%20de%20radionavegaci%C3%B3n_M%C3%B3dulo%202_Sistemas%20radar.pdf)
- [47] C. Wolff, «Radar pulsado», Radartutorial.eu. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp05.es.html>
- [48] H. Kuschel, D. Cristallini, y K. E. Olsen, «Tutorial: Passive radar tutorial», *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, n.º 2, p. 18, feb. 2019, doi: 10.1109/MAES.2018.160146.
- [49] C. S. Malavenda, C. Malavenda, y M. Martalò, «Drone-Signature-Modelling-Ma3-A Cooperative Time-Frequency Approach to Detect, Recognize and Track Drones with Audio Sensor», en *STO-MP-MSG-SET-183*, NATO, 2021, p. 22. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [50] S. Jovanoska et al., «Passive Sensor Processing and Data Fusion for Drone Detection», en *STO-MP-MSG-SET-183*, NATO, 2021, p. 16. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [51] M. Haluani, «La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: problemáticas implicaciones del uso de los drones letales». abril de 2014. Accedido: 12 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40331800003>
- [52] L. U. López-Puertas y J. P. Pinedo, «Implantación de tecnologías 5G en aeropuertos». Universidad Pontificia de Comillas, 15 de octubre de 2022. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11531/83210>
- [53] M. Estepa, «El régimen jurídico de los drones en el ámbito portuario: potencialidad y prospectiva», en *Universidad Complutense de Madrid*, 2021, p. 18. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es>
- [54] A. Sousa, «Seguridad en la utilización de drones para eventos», presentado en 2ª Jornada sobre seguridad en eventos musicales y deportivos, nov. 2019, p. 25. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/191150>
- [55] Shaping up futures, «Handley Page Heyford, último bombardero biplano de la RAF». Accedido: 25 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://shapingupfutures.net/2020/06/12/handley-page-heyford-ultimo-bombardero-biplano-de-la-raf/>
- [56] NATO, «Symposium on passive and noise radar». University College London, NATO DRG Symposium, Tech Rep.
- [57] H. D. Griffiths et al., «Television-based bistatic radar», *Proceedings of the IEE Proceedings Communications, Radar and Signal Processing*, dic. 1986, pp. 649-657. Accedido: 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.theiet.org/media>
- [58] H. Kuschel et al., «Experimental passive radar systems using digital illuminators (DAB/DVB-T)», presentado en International Radar Symposium (IRS) 2007, *Proceedings of the 2014 15th International Radar Symposium (IRS)*, 2007, pp. 1-4. Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://publica.fraunhofer.de/>
- [59] Manikas, «EE3-27: Principles of Classical and Modern Radar. Bistatic Radar», Department of Electrical & Electronic Engineering Imperial College London, feb. 2020, p. 14. [En línea]. Disponible en: [https://skynet.ee.ic.ac.uk/notes/Radar\\_7\\_Bistatic\\_Radar.pdf](https://skynet.ee.ic.ac.uk/notes/Radar_7_Bistatic_Radar.pdf)
- [60] M. Schneebeli et al., «Multistatic Radar Detection and Tracking of Drones», en *STO-MP-SET-315*, NATO, feb. 2024, p. 16. doi: 10.14339/STO-MP-SET-315.
- [61] F. Colone, «Passive Radar», presentado en Joint IEEE SPS-AESS and EURASIP Summer School on ISAC, Baiona (España): SAPIENZA-Unviersità di Roma, jun. 2023, p. 106. Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://conference.ece.ncsu.edu/isac/>
- [62] P. J. Gómez del Hoyo, «Improvement of detection and tracking techniques in multistatic passive radar systems», Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 2020. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/50902>

- [63] C. Wolff, «Sección radar equivalente». Accedido: 13 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb56.es.html>
- [64] S. Rzewuski et al., «Drone Detectability Feasibility Study using Passive Radars Operating in WIFI and DVB-T Band», en *STO-MP-MSG-SET-183*, NATO, jul. 2021, p. 14. doi: 10.14339/STO-MP-MSG-SET-183.
- [65] A. Jamal, «Calcule la sección transversal de radar (RCS) de objetos complejos en MATLAB utilizando la interfaz gráfica de usuario de POFACETS», Electronics Lovers. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://electronicslovers.com/2017/05/calculate-radar-cross-section-rcs-of.html>
- [66] L. Zuo et al., «UAV detection via long-time coherent integration for passive bistatic radar», *Digital Signal Processing*, vol. 112, p. 102997, may 2021, doi: 10.1016/j.dsp.2021.102997.
- [67] N. Del-Rey-Maestre et al., «DoA techniques in UAV detection with DVB-T based Passive Radar», presentado en 2023 IEEE International Radar Conference (RADAR), IEEE, nov. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/RADAR54928.2023.10371055.
- [68] NATO, «Exercise REPMUS 22», sep. 2022. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nato.int>
- [69] Printables, «DJI mini 3 pro drone». Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.printables.com/model/325447-dji-mini-3-pro-drone>
- [70] Dji, «DJI Mini 4 Pro». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dji.com/es/mini-4-pro/specs>
- [71] Hytobp, «HYTOBP S179 Camera Drone». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hytobp.net/products/hytobp-s179-drone-camera>
- [72] Information Design & Management, «Information Systems & Database-driven Websites», Movable Type Ltd. Accedido: 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://movable-type.co.uk/>
- [73] F. Colone et al., «A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar», *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, abr. 2009, pp. 698-722. doi: 10.1109/TAES.2009.5089551.
- [74] I. K. Kapoulas et al., «Small Fixed-Wing UAV Radar Cross-Section Signature Investigation and Detection and Classification of Distance Estimation Using Realistic Parameters of a Commercial Anti-Drone System», *Drones*, vol. 7, n.º 1, p. 39, ene. 2023, doi: 10.3390/drones7010039.

## **ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES.**

El empleo del radar pasivo basado en señales DVB-T para la detección de objetivos (específicamente mini drones) con pequeña sección radar (RCS) o moviéndose a baja velocidad en diferentes tipos de entornos, tiene implicaciones sociales, económicas y ambientales.

La capacidad de detección de drones u objetos aéreos de pequeño tamaño analizada en esta investigación demuestra una importante implicación social. Como se vio en el capítulo correspondiente (2.4), contribuye a incrementar la seguridad en eventos públicos, pudiendo prevenir ataques terroristas contra la población civil. Además, la seguridad en fronteras, aeropuertos o instalaciones portuarias mejorará debido a la capacidad de detección temprana de estos objetos, aumentando la seguridad nacional [51]. Del mismo modo puede resultar beneficioso para los trabajadores en la mar, como pescadores y tripulantes de buques, ya sean civiles o militares.

Sin embargo, existe cierta preocupación sobre la privacidad y seguridad de los datos recopilados por el radar. Puede incluir información confidencial sobre la ubicación y el movimiento de los buques y personas a bordo, así como de los drones. Es importante garantizar que la información recopilada por el radar se encuentra guardada de forma segura y se emplea exclusivamente para fines legítimos.

En el aspecto económico, la instalación de estos sistemas no supondría una gran inversión para las naciones o empresas privadas puesto que sólo consiste en el montaje de antenas pasivas como la empleada en este proyecto. Del mismo modo, el mantenimiento de dichos dispositivos no supone un coste elevado, ya que no se debe tener en cuenta ninguno de los componentes necesarios que se emplearían si se tratara de un radar activo.

Se reduce la necesidad de reparaciones costosas y tiempos de inactividad prolongados al permitir una detección precisa y temprana de objetos, evitando colisiones y daños a la embarcación o el área de interés a proteger.

En lo relativo a las implicaciones ambientales, el empleo de señales de televisión (DVB-T) ya existentes para la realización de este trabajo, no incrementa la contaminación del medio ambiente puesto que, al no generar nuevas señales, no aumenta la cantidad de ondas preexistentes. Al no emitir ningún tipo de onda electromagnética ni señal nueva, se consideran sistemas difíciles de detectar e interceptar. De esta manera, contribuye a mejorar la seguridad en aplicaciones militares, reduciendo el riesgo para la salud y la vida silvestre comparado con el que causaría cualquier radar de tipo activo (debido a la radiación emitida por el sistema).

## **ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES.**

El empleo de drones (UAS) para usos de protección civil o aumento de la seguridad en diferentes ámbitos, es una clara consecuencia positiva de lo que los avances en la tecnología proporcionan. Aun así, como en todos los ámbitos en los que ha habido un gran avance tecnológico, debe realizarse un balance sobre las ventajas y desventajas que estos proporcionan.

El empleo no ético o de forma incorrecta de estos dispositivos conlleva consecuencias muy graves para la sociedad, tanto por la capacidad de atacar a las personas como por la repercusión económica que pueden tener; al causar daños a material con coste elevado.

Como ocurre con todas las investigaciones, creaciones y desarrollos humanos, los sistemas de detección mediante radar pasivo también están diseñados con un propósito específico, permitiéndoles cumplir una función en la sociedad. En el caso del sistema propuesto en el presente trabajo, su propósito es llevar a cabo detecciones, localizaciones y seguimiento de objetos de tamaño reducido, específicamente mini drones. Siendo posible realizarlo con la antelación suficiente para evitar ataques en conflictos armados, incrementar la seguridad en bases militares y de los ciudadanos, etc.

Sin embargo, aunque el propósito de estos sistemas es siempre el mismo, la función que cumplen dentro de la sociedad o la intención con la que se emplean, puede variar de la concebida inicialmente. Esto podría ocurrir como sucede con la creación de un arma cuya función inicial es la disuasión y proliferación de la paz. En muchos casos, estos objetos terminan siendo empleados durante actos defensivos u ofensivos, adoptando un papel opuesto al inicial.

Este ejemplo puede aplicarse a los sistemas de detección pasiva. Este tipo de radares podrían ser integrados, por ejemplo, en sistemas de defensa costera. Su función de detección continuaría existiendo, pero proporcionaría los datos obtenidos, como la posición, rumbo y velocidad de los contactos, con el objetivo de realizar un ataque contra dicho objeto mediante, por ejemplo, el lanzamiento de un misil guiado.

En este caso, la investigación y desarrollo del sistema habrá provocado de forma inesperada, la pérdida de vidas humanas aun teniendo en cuenta que la función para la que fue creado no implicaba daños.

Como conclusión, estos sistemas pueden causar cierto daño a la sociedad, pero se debe tener en cuenta que dicha consecuencia proviene del empleo incorrecto que puede llevar a cabo el ser humano, no por la propia función por la que fue creado. Por esta razón, las implicaciones éticas dependen completamente de la humanidad y la forma en la que se utilice. De ella depende el correcto empleo de un sistema creado con buena ética, pensado para traer beneficios a la sociedad además del ahorro energético que presenta.

Por último, cabe destacar que no se han vulnerado derechos, datos personales, datos de seguridad, ni archivos confidenciales, siendo expuestos todos los archivos empleados en la bibliografía (Bibliografía.) del presente trabajo.

## ANEXO III: INTERFAZ GRÁFICA: POFACETS.

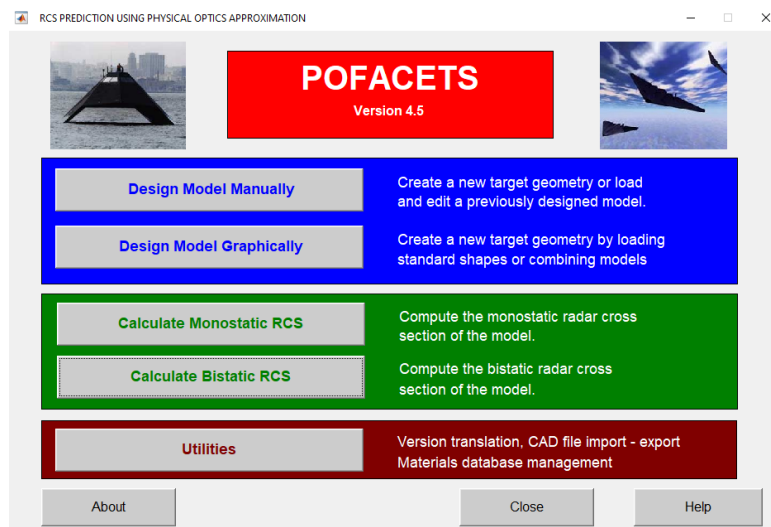


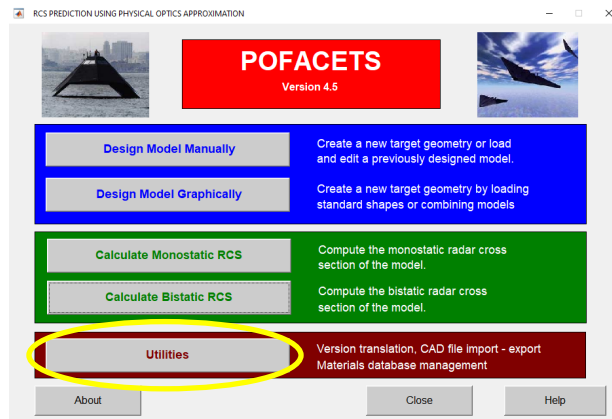
Figura A - III - 1. Página principal Pofacets.

Pofacets es una interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface, GUI) en Matlab, desarrollada por David C. Jenn; profesor y director de la US Naval Postgraduate School, que utiliza aproximaciones de óptica física (Physical Optics, PO) para predecir la RCS de objetos complejos y es precisa para frecuencias relativamente altas.

Permite simular la RCS para distintos ángulos de incidencia y observación, ajustar la rugosidad de la superficie y la resistividad del material, además de elegir la polarización y frecuencia de operación. También permite importar archivos AutoCAD (.STL) y visualizar los resultados en gráficos 3D. Además de permitir cambios en los materiales de los objetos para estudiar el cambio de la RCS [65].

El programa se divide en tres partes:

- 1) Diseño del modelo: Se pueden diseñar o editar modelos manual o gráficamente, empleando facetas triangulares. El diseño manual requiere introducir las coordenadas de los vértices y descripciones de las facetas de forma manual. Por otra parte, el modelo gráfico facilita la creación automática de formas estándar de modelos y la combinación de modelos existentes, de tal forma que se obtengan objetivos más complejos.
- 2) Cálculos de RCS: Permite descargar un modelo previamente diseñado y calcular su RCS, tanto con modelos monoestáticos como biestáticos. Se puede variar el ángulo de observación para una frecuencia y ángulo de incidencia fijos o en función de la frecuencia para un ángulo de observación y de incidencia fijos.
- 3) Utilidades: Se pueden transformar archivos de las versiones anteriores a la actual, así como importar y exportar archivos de y hacia el software CAD comercial. Esta sección también realiza la gestión de base de datos de materiales. En este trabajo se han importado archivos CAD obtenidos de internet, los cuales simulan el dron empleado en las mediciones reales, el dron “DJI mini 4K”.



a)



b)

**Figura A - III - 2. Importación imágenes a Pofacets.**

Al clicar en el apartado “Utilities” señalado en la Figura A - III - 2 se abre la pestaña de la derecha que permite la importación de archivos de CAD (.STL). En nuestro caso, la figura importada es un dron de dimensiones y características similares al empleado en las mediciones reales y se encuentra representado en la Figura A - III - 3.



**Figura A - III - 3. Archivo CAD importado (.STL) [69].**

Una vez cargado, el programa crea las siguientes imágenes (Figura A - III - 4).

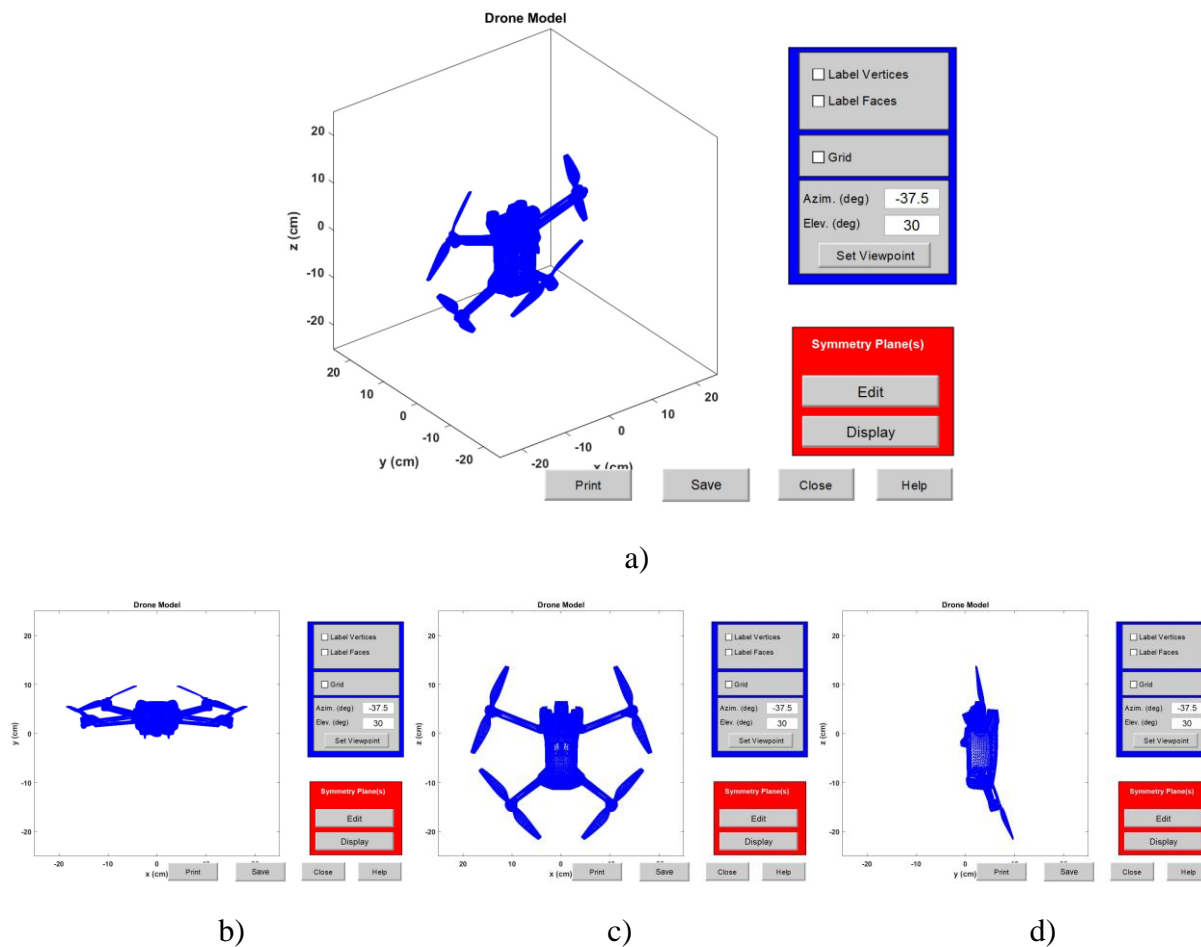


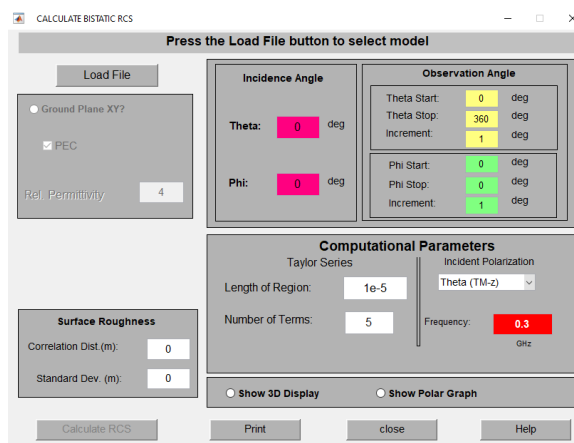
Figura A - III - 4. Representación dron en las tres dimensiones.

De las dos opciones mencionadas anteriormente, en este proyecto se han llevado a cabo mediciones de RCS con la opción biestática, es decir, con el transmisor y receptor en diferentes localizaciones. Después de elegir esta opción, se debe determinar en función de qué parámetro se realizará la medición, ángulo o frecuencia.

En el caso de calcular datos en función de ángulo (Figura A - III - 5). Los objetos dispersantes se aproximan mediante arreglos de triángulos (facetas), y el campo dispersado de cada triángulo se calcula como si estuviera aislado. El proceso está compuesto por diferentes fases:

- Carga del archivo desde el directorio de modelos.
- Ángulo de incidencia. Se representan con dos ángulos diferentes, theta ( $\theta$ ) y phi ( $\varphi$ ). Sus valores se encuentran entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .
- Ángulos de inicio y fin. Definición del valor de theta y phi.
- Incremento. Define el paso en grados para los ángulos anteriores.
- Uso de plano de tierra. Activado para incluir los efectos del suelo en los cálculos de RCS. Es el plano XY.

- Rugosidad de la superficie. Permite modelar una superficie rugosa introduciendo valores para la distancia de correlación y desviación estándar.
- Mostrar gráfico 3D y gráfico polar. Se puede elegir el tipo de gráfico en el que visualizar los resultados.
- Parámetros computacionales. Pudiendo ajustar el largo de la región de la serie de Taylor (Lt), el número de términos en la serie (Nt) y la frecuencia/longitud de onda. Posee valores predeterminados:  $L_t = 0,05$  y  $N_t = 5$ .
- Imprimir. Imprime la GUI de RCS.
- Calcular RCS. Al final del cálculo muestra los gráficos y solicita al usuario guardar los resultados, en formatos \*.mat y \*.m, para poder emplearlos en Matlab.



**Figura A - III - 5. Cálculo RCS biestática en función del ángulo.**

En el caso de que se elija la opción de calcular la RCS en función de la frecuencia (Figura A - III - 6), el proceso es el mismo al explicado anteriormente. El cambio se encuentra en la variación de la frecuencia a lo largo del cálculo de la RCS, en lugar del cambio de ángulo.

En vez de definir los ángulos de inicio y fin, se establecen los rangos de frecuencias. El valor más bajo permitido es 0,1 GHz y el más alto es 30 GHz.

Existe una distancia de correlación, siendo ésta el valor promedio a la cual las variaciones de la superficie se vuelven no correlacionadas. Además, la desviación estándar mide la rugosidad de la superficie en relación con su valor medio.

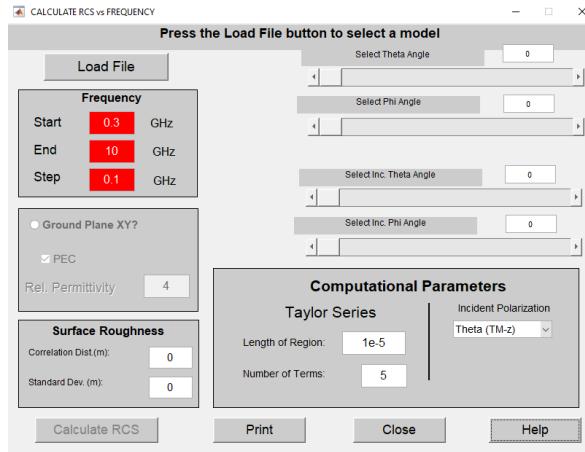
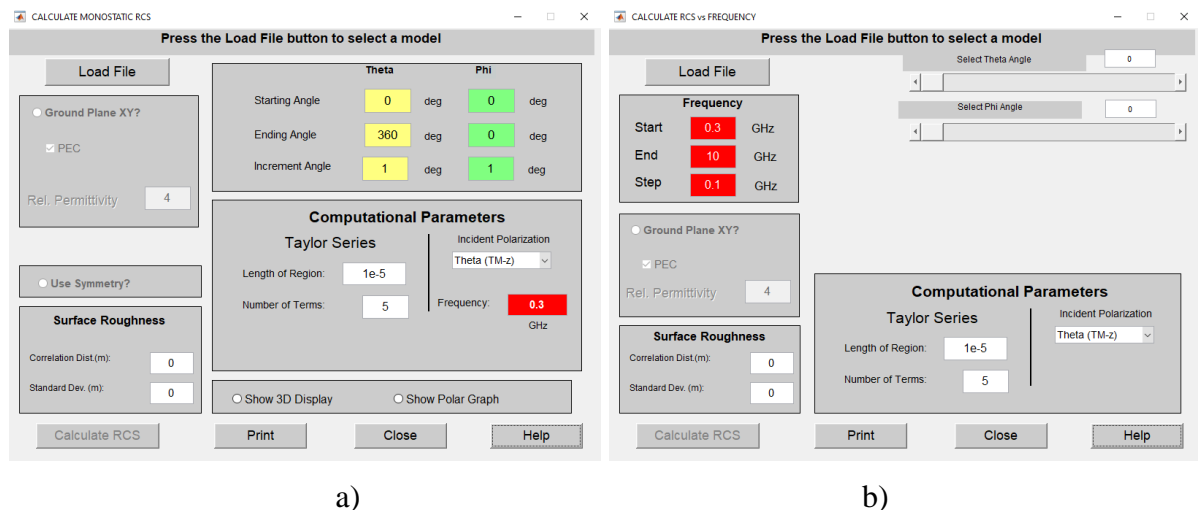


Figura A - III - 6. Cálculo RCS biestática en función de la frecuencia.

En el caso de realizar el cálculo monoestático (Figura A - III - 7), se debe tener en cuenta que no se podrán variar los ángulos de incidencia y recepción, ya que la emisión y recepción se realiza en el mismo lugar. Pudiendo variar solo los ángulos de medición, theta y phi del objeto. Esta diferencia, con respecto a los cálculos biestáticos, ocurre tanto en la medición en función de frecuencia como en función del ángulo.



a)

b)

Figura A - III - 7. Cálculo RCS monoestática.

Además, el programa informático permite variar el ángulo con el que se incide en el objeto (Figura A - III - 5). De esta forma, aunque la RCS de un contacto sea constante, si las ondas rebotan en una superficie mayor o en una zona diferente, puede ser que se coincida con un valor de RCS mayor en ese punto. Cabe destacar que en el caso de este trabajo el dron está en vertical no como los representados en la Figura A - III - 8 que se encuentra en horizontal. Es decir, en este caso el ángulo de incidencia theta es  $0^\circ$  (aunque se emplea  $10^\circ$  en vez de  $0^\circ$  para evitar las aristas del dron y obtener una correcta detección) y phi es  $0^\circ$  (aunque se considera  $10^\circ$  por el mismo motivo). En este trabajo, el ángulo de observación varía en theta desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

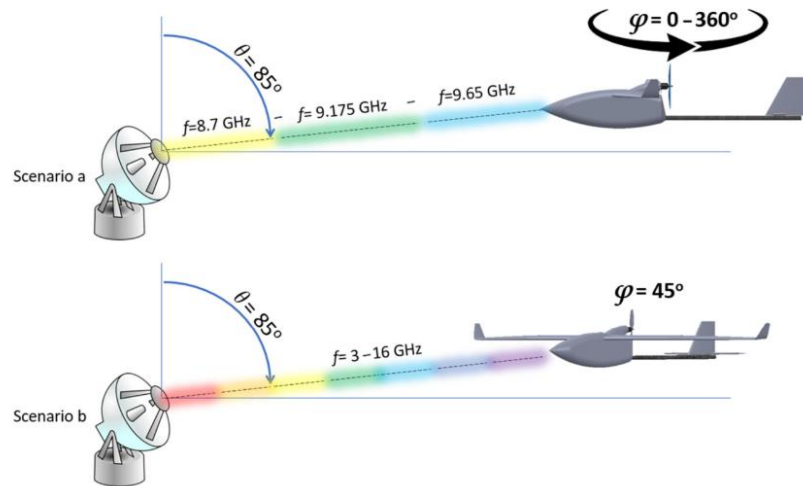


Figura A - III - 8. Representación gráfica de los parámetros de simulación [74].

Las diferentes frecuencias empleadas en la simulación de la RCS del dron se encuentran entre 0,4 y 0,7 GHz ya que es un rango que incluye las señales de televisión que se han empleado en la detección real del dron.

Se ha realizado una simulación de la RCS para 0,4, 0,55 y 0,7 GHz. Como se representa en las siguientes figuras (Figura A - III - 9, Figura A - III - 10 y Figura A - III - 11). Mayor frecuencia, mayor es la RCS del blanco en cualquier dirección en la que incida la onda, lo que demuestra que será más fácil su detección.

Los valores obtenidos en la simulación se encuentran alrededor de -20 dBsm, lo que concuerda con los datos obtenidos en otros estudios como son los representados en la Figura 3-13.

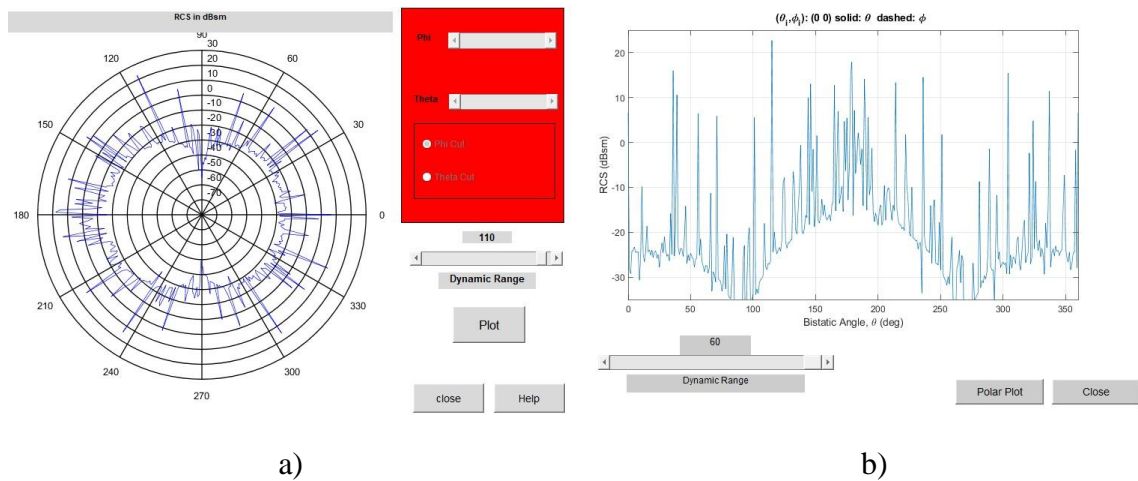


Figura A - III - 9. Gráficos RCS a 0,4 GHz.

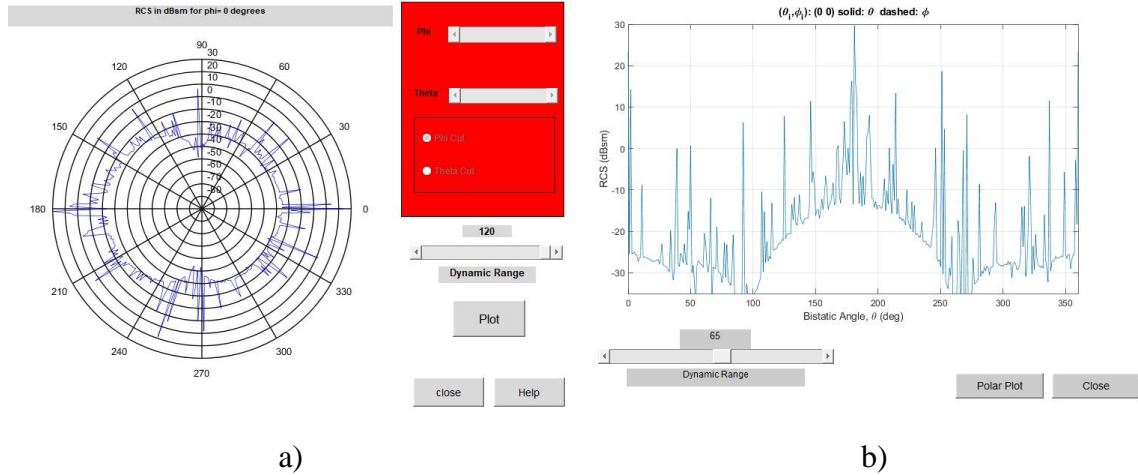


Figura A - III - 10. Gráficos RCS a 0,55 GHz.

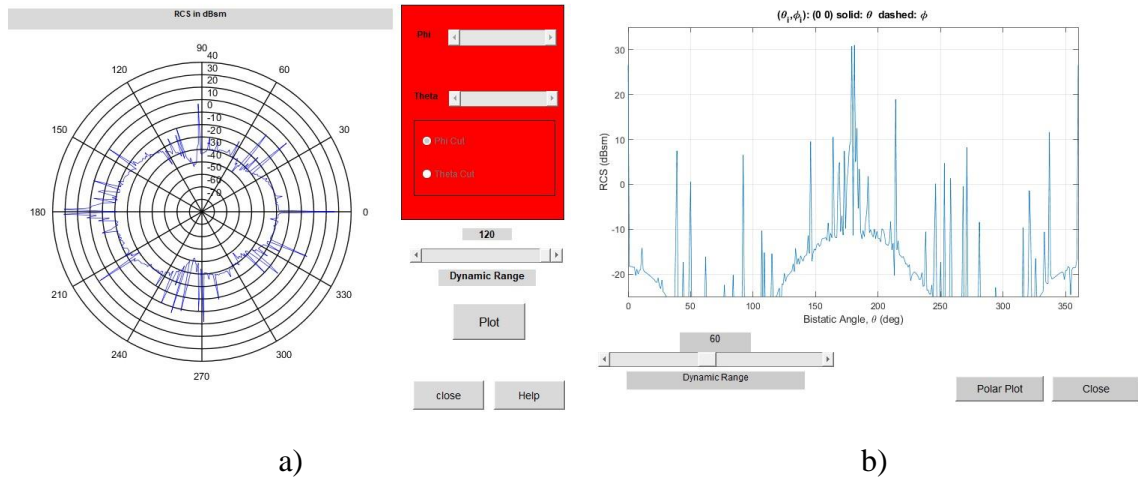


Figura A - III - 11. Gráficos RCS a 0,67 GHz.

Las tres figuras anteriores han sido simuladas con un ángulo de incidencia theta igual a  $0^\circ$  y phi igual a  $0^\circ$ . Para mejorar los resultados, se ha introducido un valor de theta igual a  $10^\circ$  y de phi igual a  $10^\circ$  de tal forma que se evita que el reflejo de la señal coincida exactamente con las aristas del contacto. En las siguientes figuras (Figura A - III - 12, Figura A - III - 13 y Figura A - III - 14) pueden observarse la RCS para cada frecuencia en función de los ángulos de observación  $\theta$  y  $\phi$ .

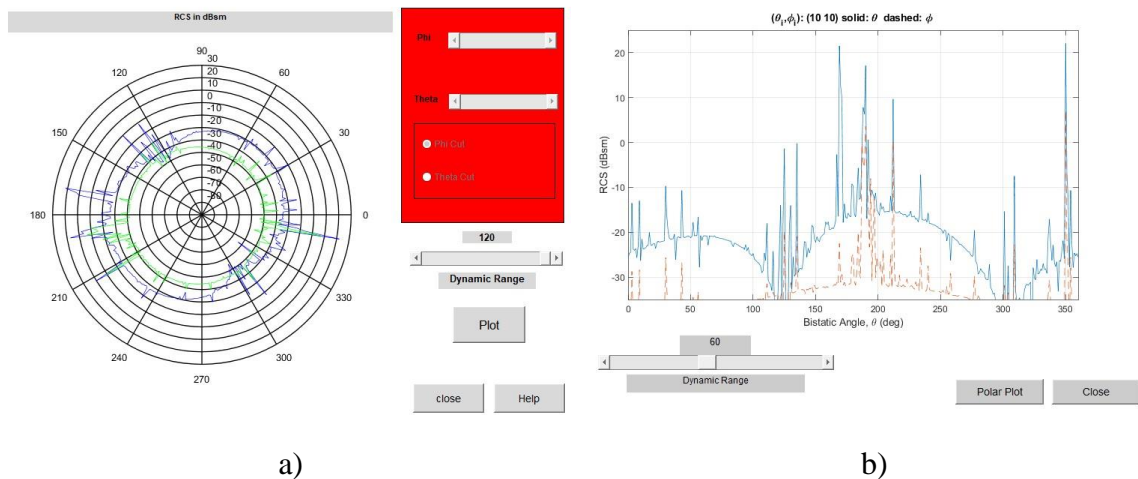
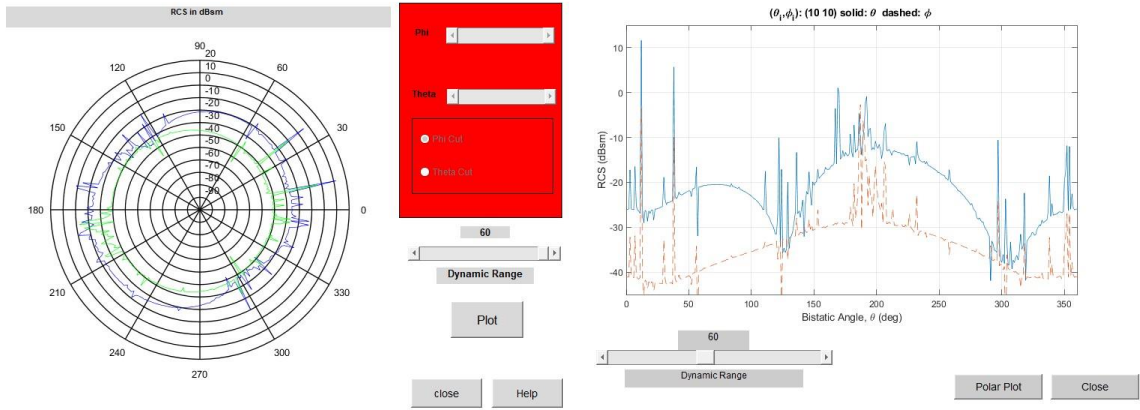


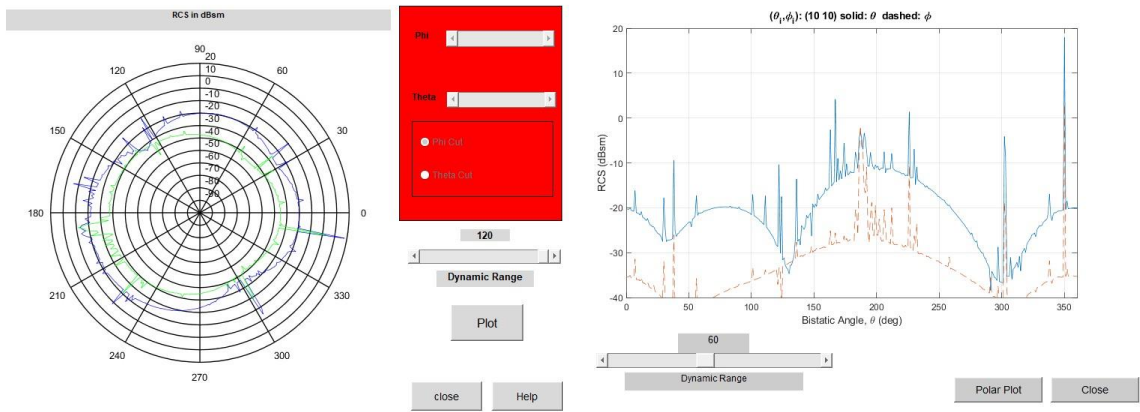
Figura A - III - 12. Gráficos RCS a 0,4 GHz sin aristas.



a)

b)

Figura A - III - 13. Gráficos RCS a 0,55 GHz sin aristas.



a)

b)

Figura A - III - 14. Gráficos RCS a 0,67 GHz sin aristas.

## ANEXO IV: CÓDIGO SIMULACIONES MATLAB.

En el presente anexo se plasma el código de Matlab y los datos que se varían en la realización de las mediciones.

```
%% Configuración de los parámetros de captura de imágenes de radar pasivo.
```

```
description: %Description for simulation
fc: 538000000 % Operating frequency in function of the DVB-T Channels
           % 498 MHz -- C24
           % 538 MHz -- C29
           % 666, 674, 682, 690 MHz -- C45-C46-C47_C48

fs: 8000000 % Sampling rate (8 MHz, 16 MHz, 32 MHz)
source: GNURADIO % Source of generated files: SIM, GNURADIO, HACKRF, ALCALA
showscenario: true % Shows scenario simulation

% ===== Transmitter =====
tx:
- pos: [3827,5277,100] % Initial position (TOMBA)
  latitude: 42.444657 % Latitude tx
  longitude: -8.660041 % Longitude tx
  midpointlatitude: 42.421111 % Latitude Mid Point tx-rx
  midpointlongitude: -8.6833297 % Longitude Mid Point tx-rx
  bearing: 36.2 % Bearing regarding to the radar (degrees)
  az: 45 % Initial orientation azimuth
  el: 0 % Initial orientation elevation
  pow: 2000 % Power
% ===== Receiver =====
rx:
pos: [0,0,0] % Initial position
latitude: 42.397763 % Latitude rx
longitude: -8.706672 % Longitude rx
az: 180 % Initial orientation azimuth
el: 0 % Initial orientation elevation
numarrayelms: 1 % Number of antenna array elements (must be >=2)
gain: 0 % Gain in dB
NF: 10 % Noise figure in dB
REFTEMP: 290 % Reference temperature (in degrees kelvin)

% ===== Simulation =====
sim:
type: EXTERNAL
tsim: 10 % Simulation duration
dt: 0.001 % Delta simulation time
EXTERNAL:
  tspath: dvbt.bin % Transport stream file path
LFM:
  PRF: 1000 % PRF (the ratio of sampling rate and PRF must be all integers)
  bw: 12000000 % Signal bandwidth
  tbprod: 20 % Time-bandwidth product
tgt:
- pos: [-465, 2665, 10] % Target 1
  vel: [10, 10, 10]
- pos: [-3465, 465, 10] % Target 2
  vel: [-10, 10, -10]
- pos: [-2465, 2365, 10] % Target 3
  vel: [20, -20, 0]
rcs: 0.001 % RCS Target unidades naturales (dBsm)
```

```

% ===== Processing & Detection =====

proc:
  dmax: 8000      % Max distance in m
  dmin: 0         % Min distance in m
  fdmin: -60     % Min doppler in Hz
  fdmax: +60     % Max doppler in Hz
  CPI: 1.0       % Coherent processing time CPI= 1s, CPI= 2s, CPI=3 s, CPI= 6 s
  az:
    min: -30     % Min azimuth angle to scan (degrees)
    max: +30     % Max azimuth angle to scan (degrees)
    step: 1      % Difference between two consecutive azimuth scans (degrees)
  CFAR:          % Constant False Alarm Rate  Detection
    active: true
    GuardBandSize: 5 % Width of guard band cells on each side of the CUT cell
    TrainingBandSize: 10 % Width of the training band cells on each side of the CUT cell
    ProbabilityFalseAlarm: 1e-6 % Required probability of false alarm

```

## ANEXO V: RESULTADOS COMPLETOS DE LAS SIMULACIONES.

### A) Simulación con contacto de RCS (-20 dBsm).

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos de los tres contactos que simulan drones/lanchas con RCS igual a -20 dBsm ( $0,01 m^2$ ). Se ha llevado a cabo la medición durante 10 segundos.

Cada figura está compuesta por cuatro imágenes:

- Función de ambigüedad cruzada (Cross Ambiguity Function, CAF) en 3D, representando la magnitud del contacto (dB), la FDOA (Hz) y la TDOA ( $\mu s$ ).
- CAF en 2D puesto que es la imagen en la que mejor se observan los tres contactos, pudiendo comprobar también el valor de la SNR.
- Función de ambigüedad compleja (Complex Ambiguity Function, CAF) en 2D, comparando la frecuencia Doppler (Hz) y la distancia (m).
- Tasa de falsas alarmas constantes (Constant False Alarm Rate, CFAR). Se observa la detección real que sería representada en el radar.

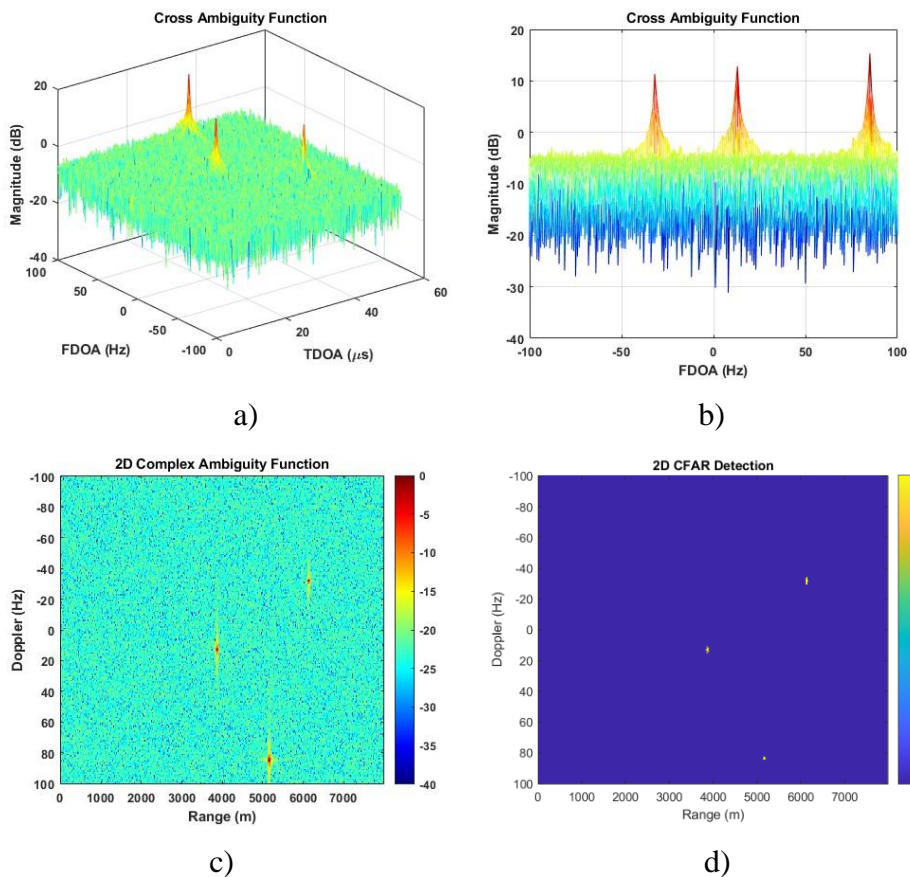


Figura A - V - 1. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 1 s$ ).

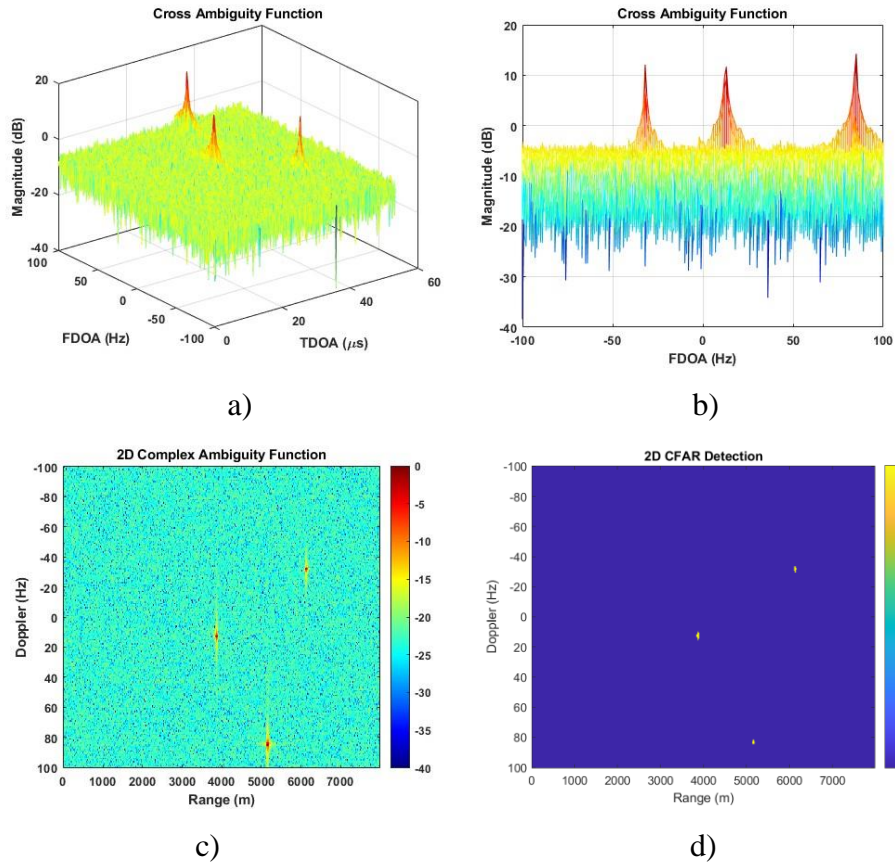


Figura A - V - 2. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 2$  s).

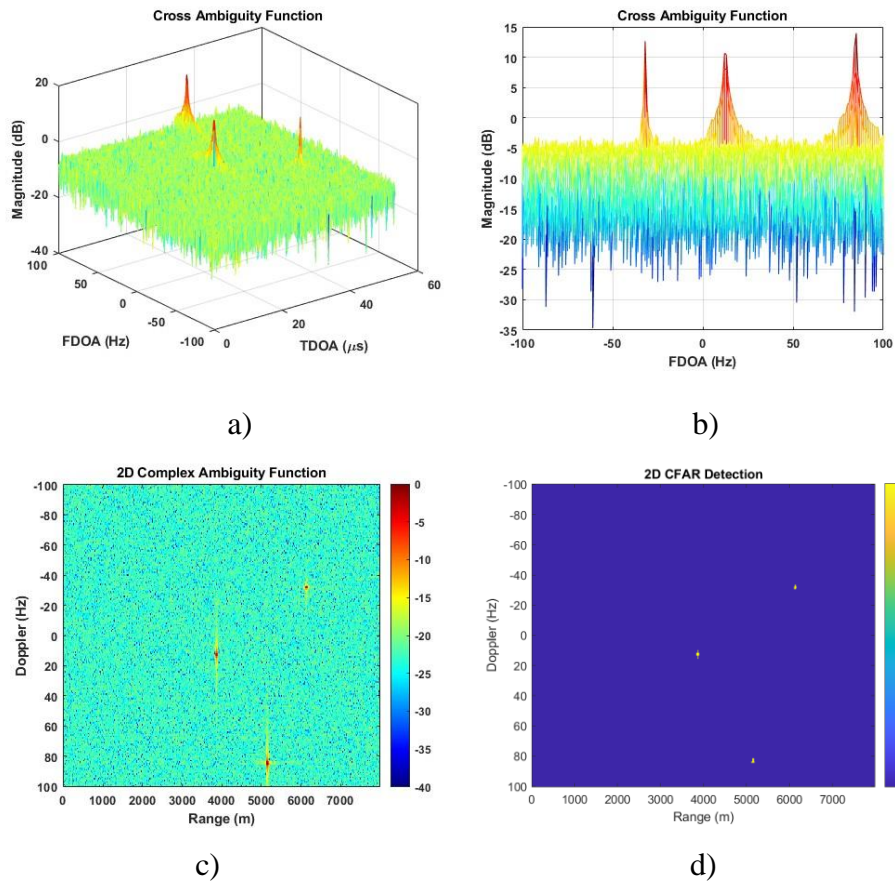


Figura A - V - 3. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 3$  s).

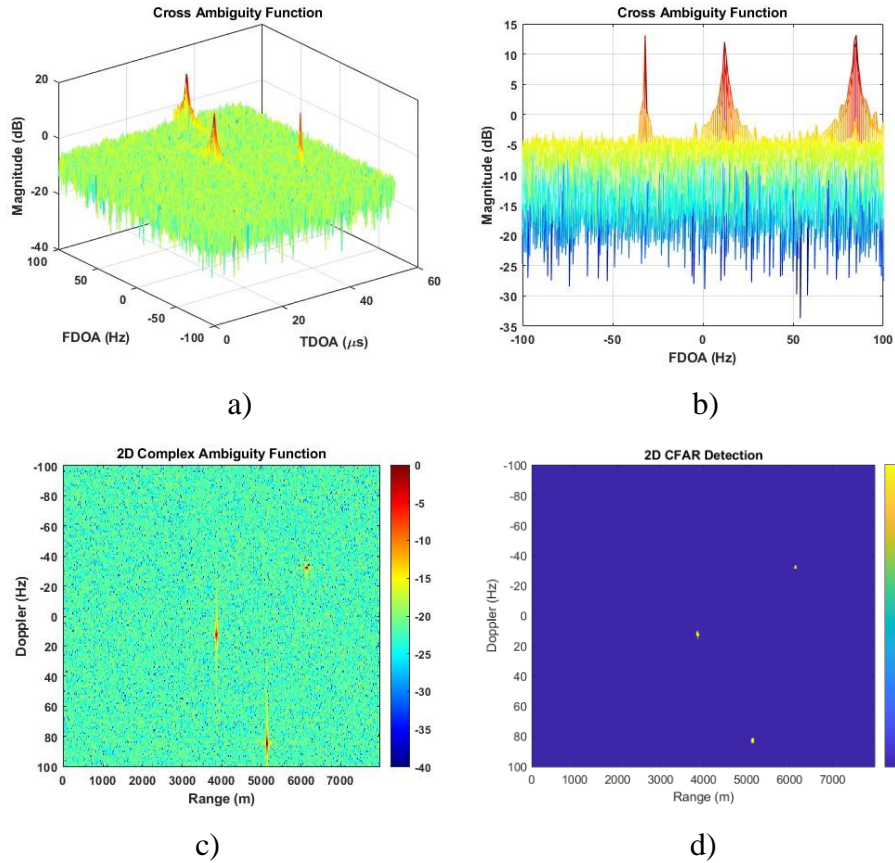


Figura A - V - 4. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 4$  s).

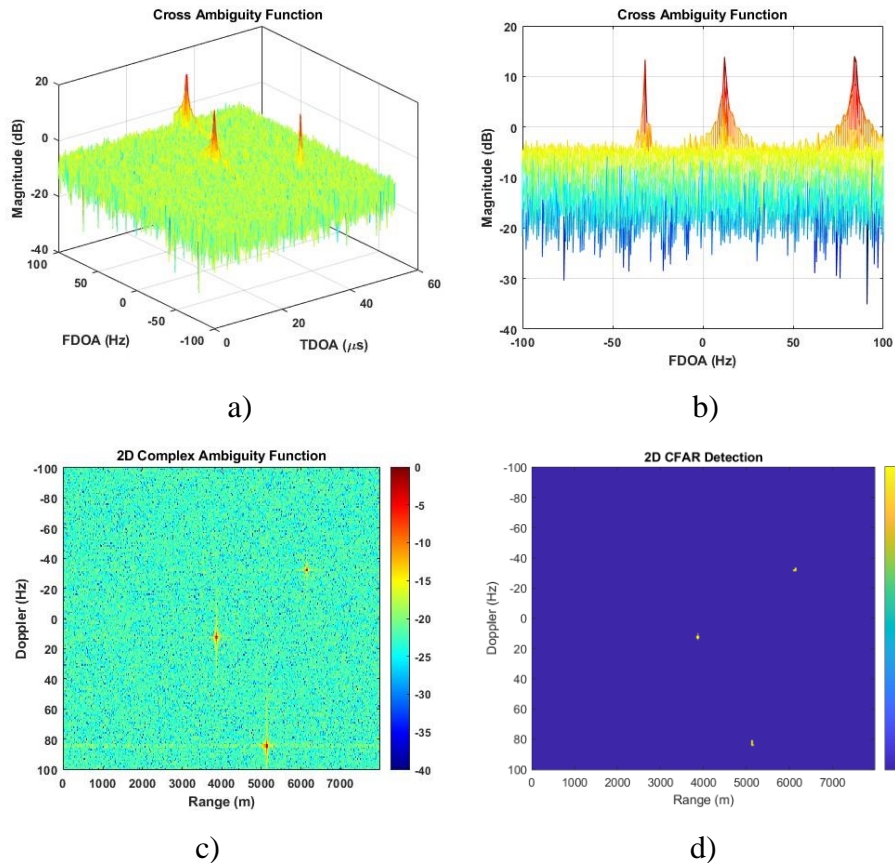


Figura A - V - 5. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 5$  s).

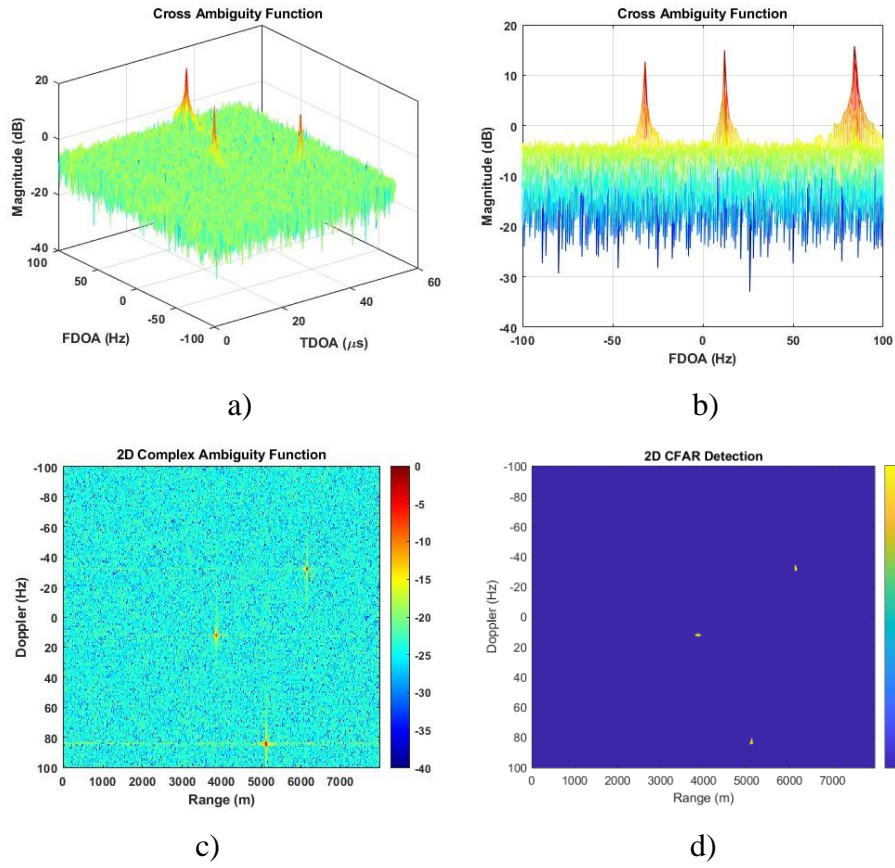


Figura A - V - 6. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 6$  s).

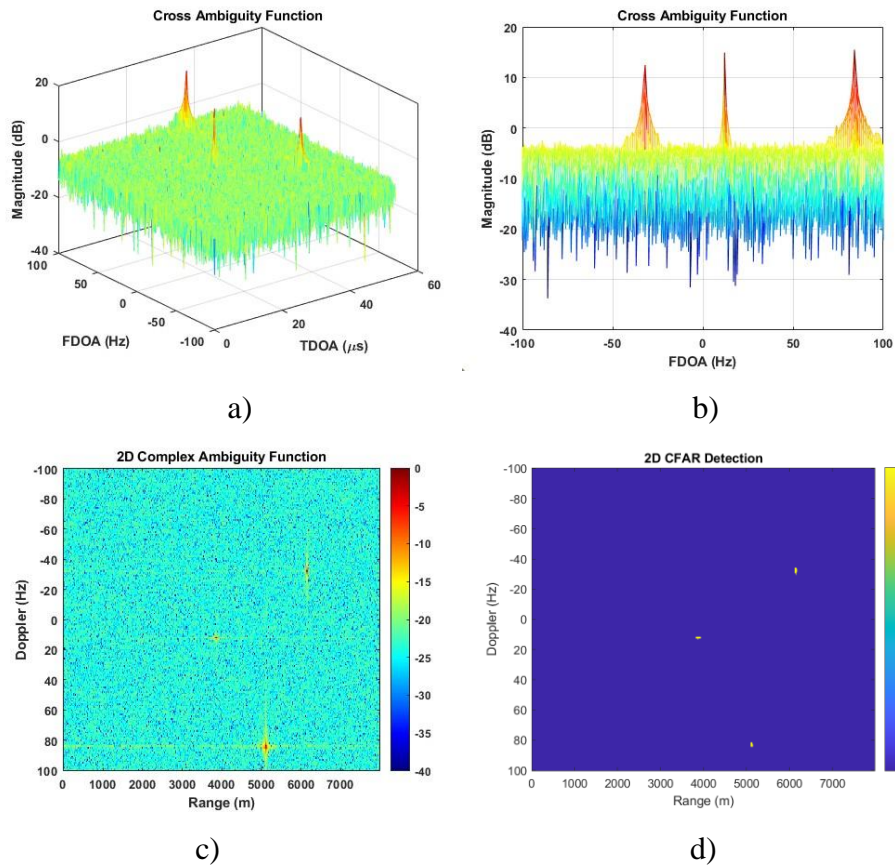


Figura A - V - 7. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 7$  s).

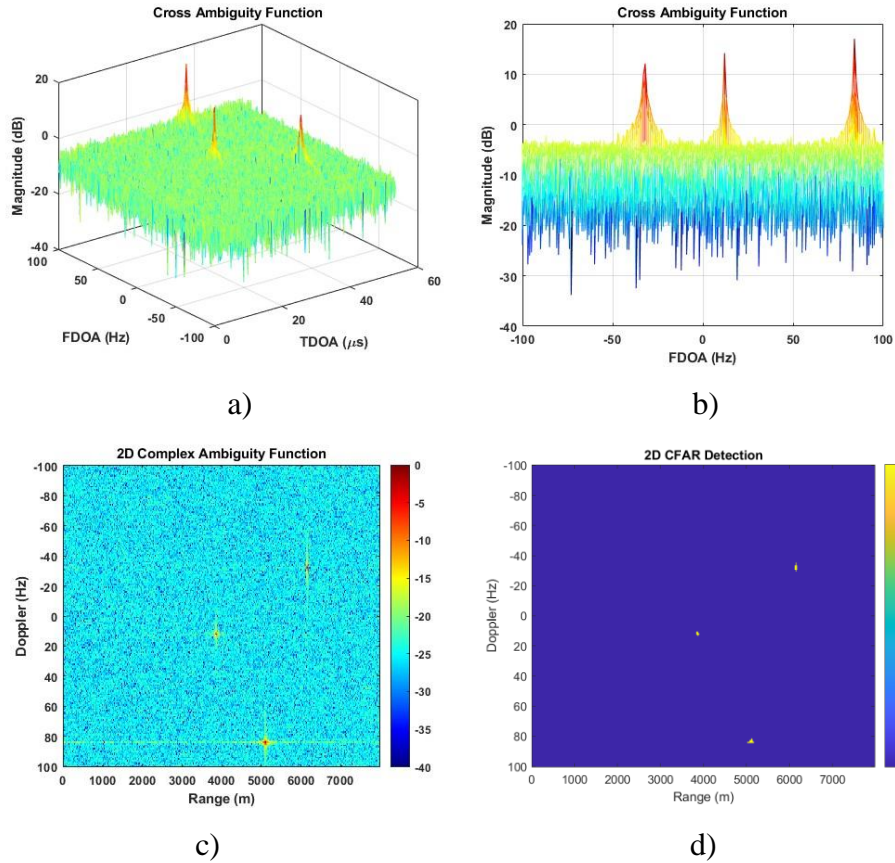


Figura A - V - 8. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 8$  s).

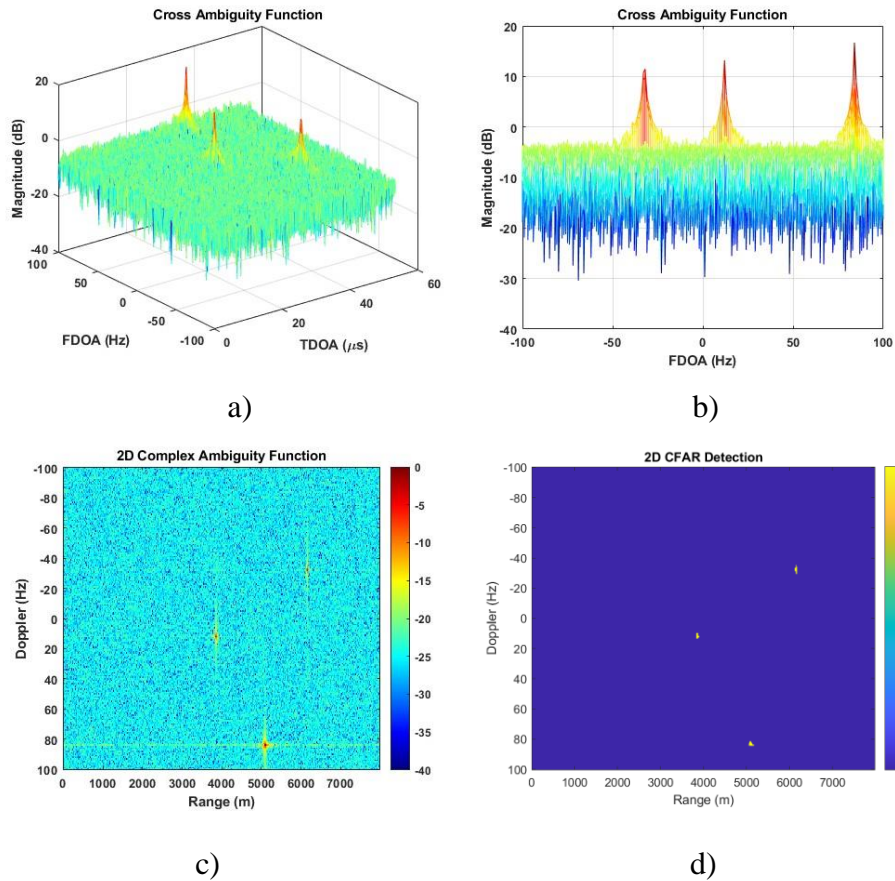
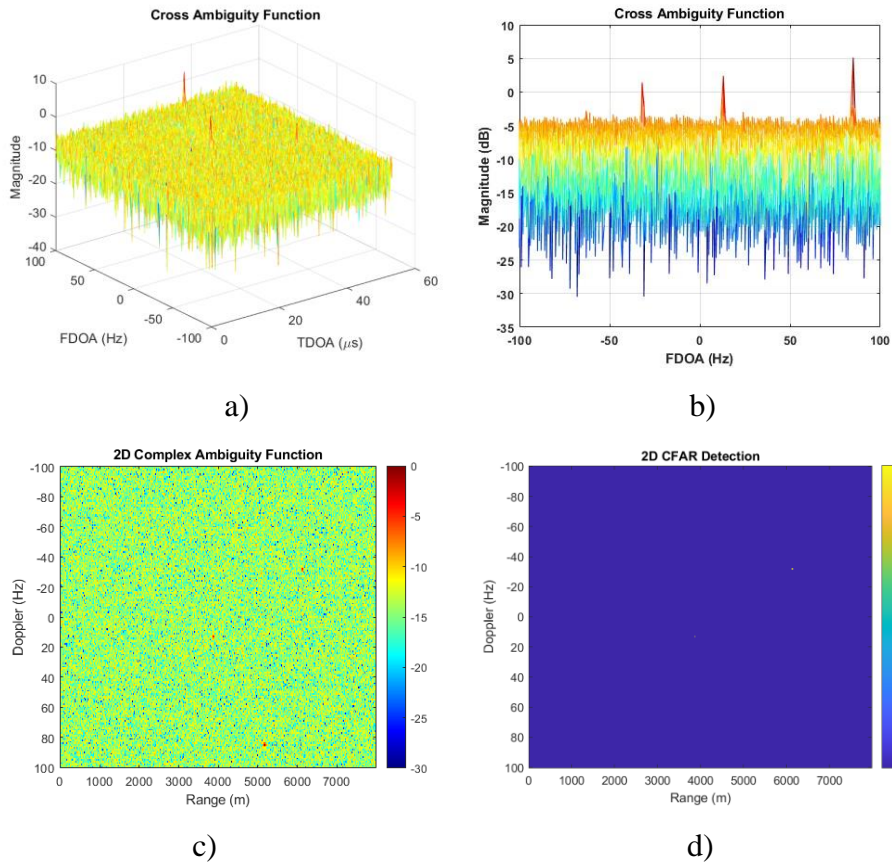


Figura A - V - 9. Contacto con RCS -20 dBsm ( $t = 9$  s).

**B) Simulación con contacto de RCS (-30 dBsm).**

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos del contacto que simula un mini dron con RCS igual a -30 dBsm ( $0,001 m^2$ ). Se ha llevado a cabo la medición durante 20 segundos.



**Figura A - V - 10. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 1$  s).**

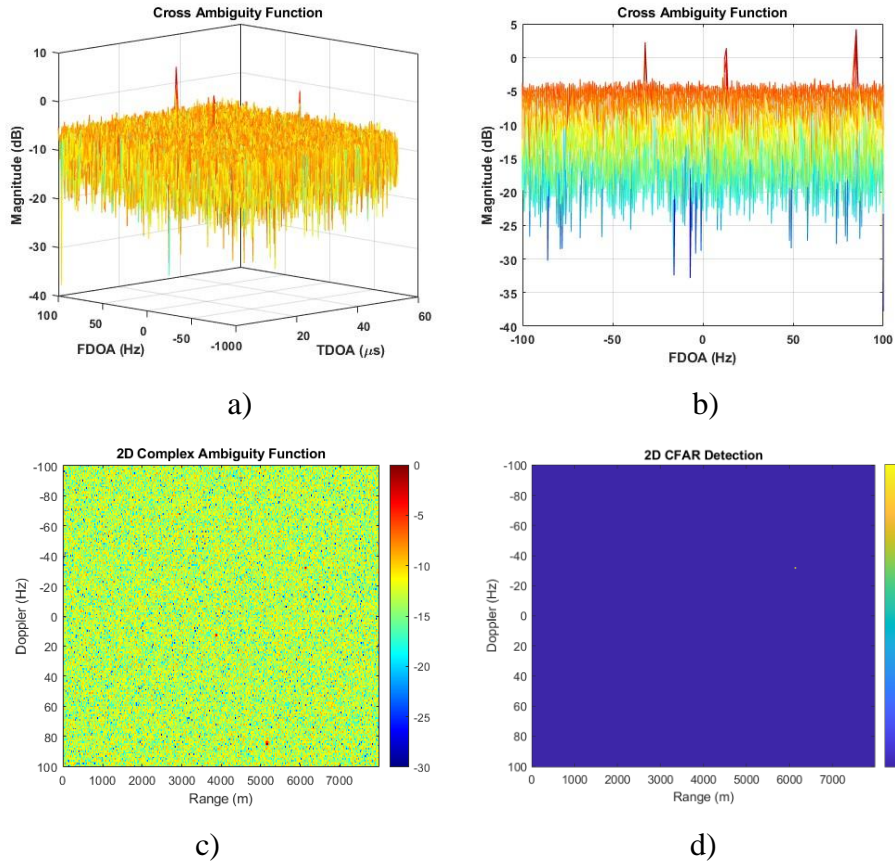


Figura A - V - 11. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 2$  s).

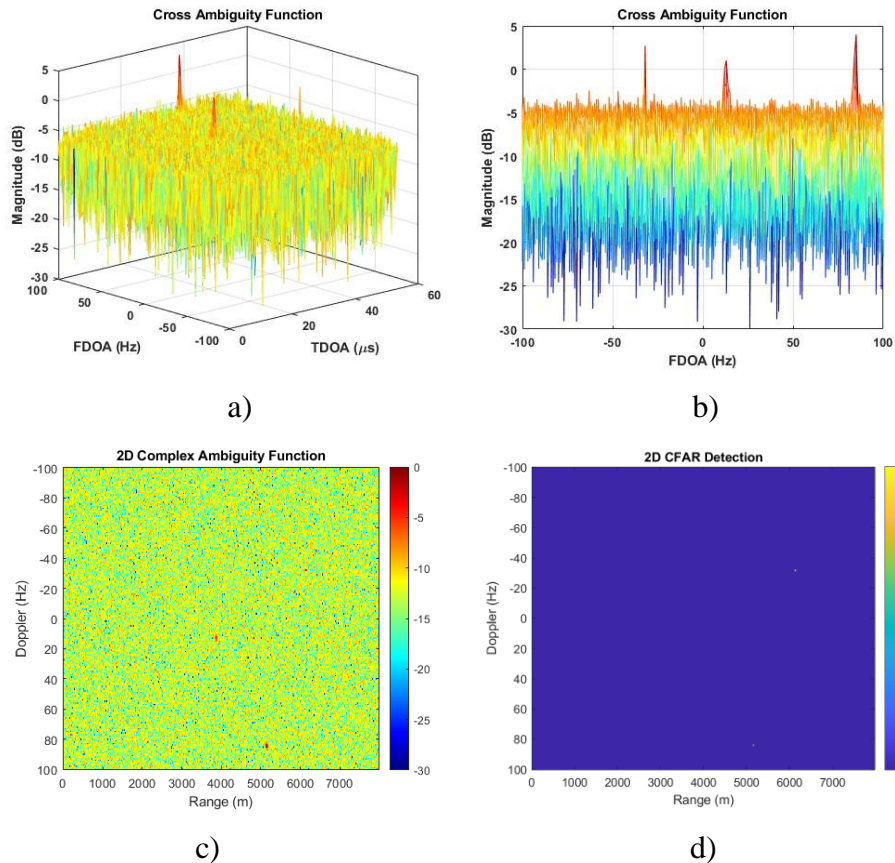


Figura A - V - 12. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 3$  s).

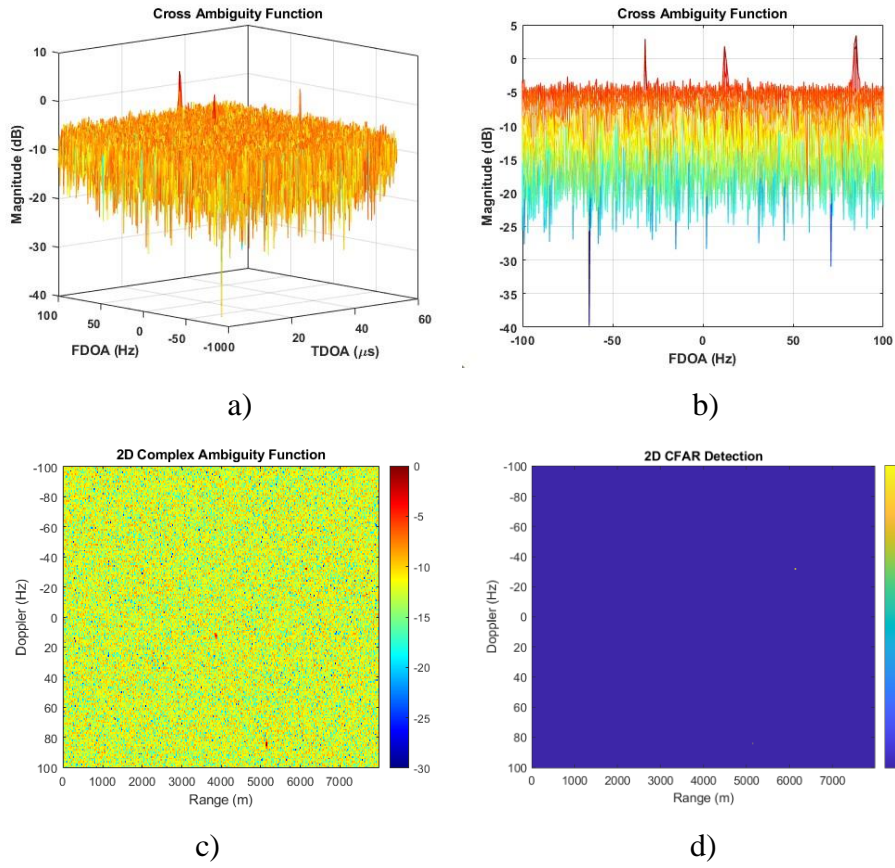


Figura A - V - 13. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 4$  s).

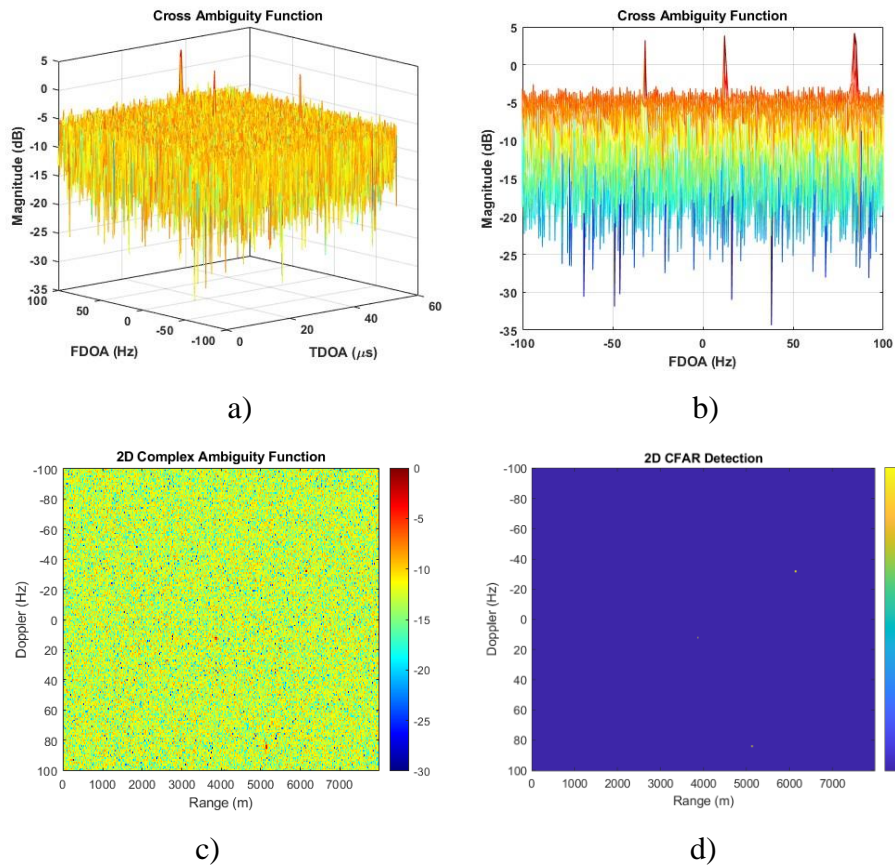


Figura A - V - 14. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 5$  s).

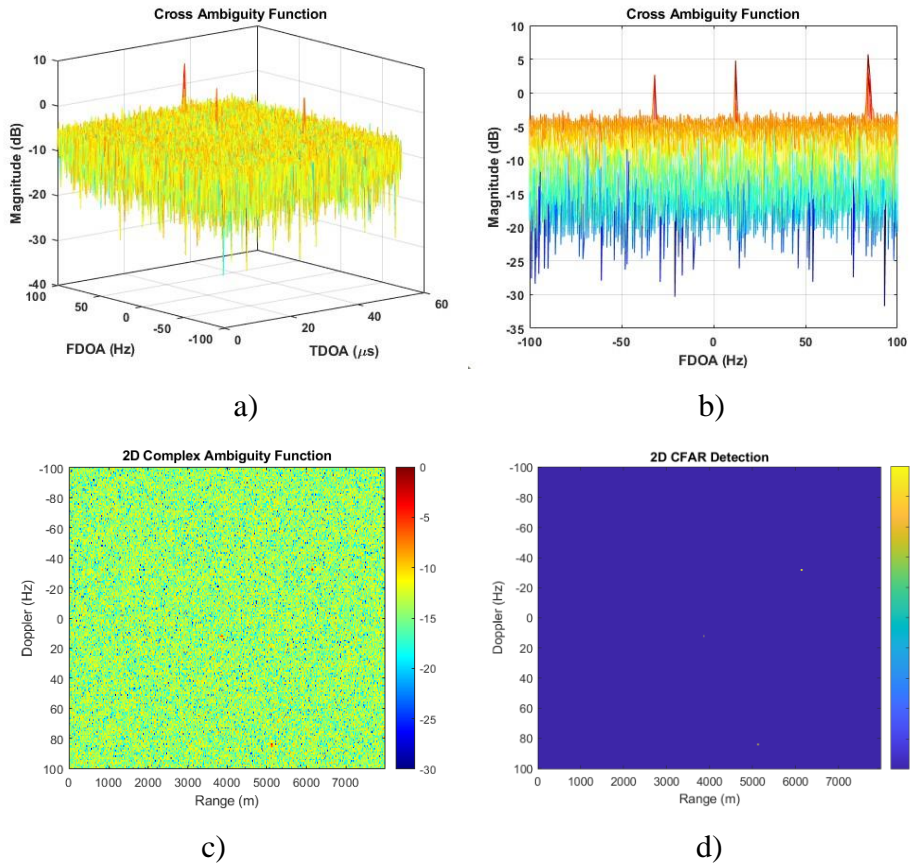


Figura A - V - 15. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 6$  s).

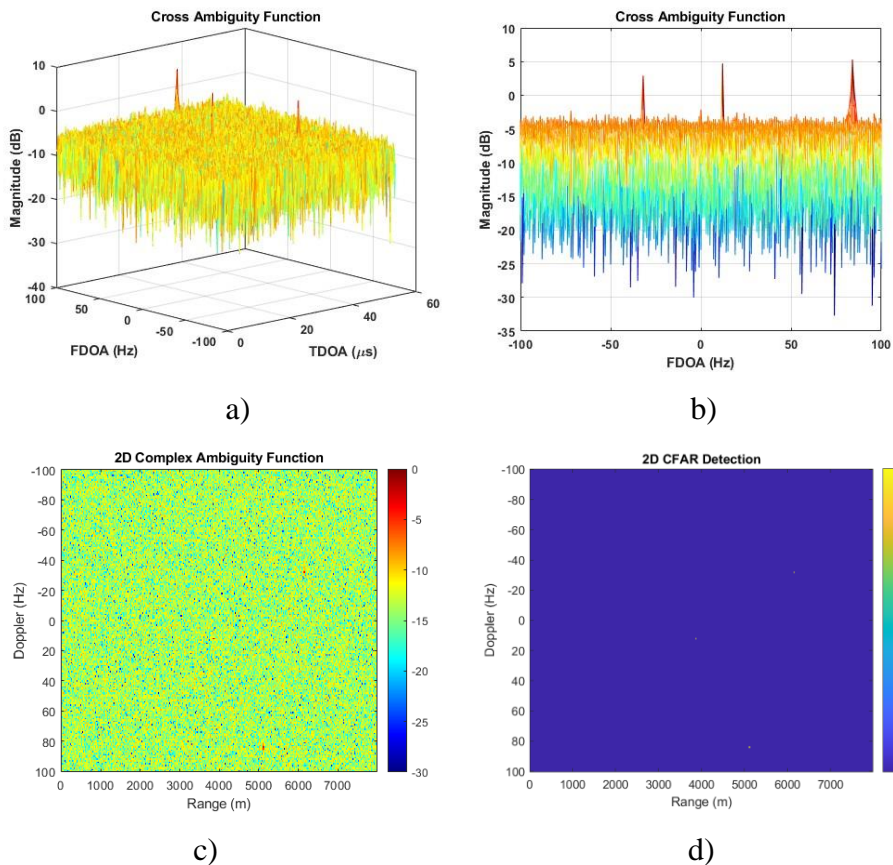


Figura A - V - 16. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 7$  s).

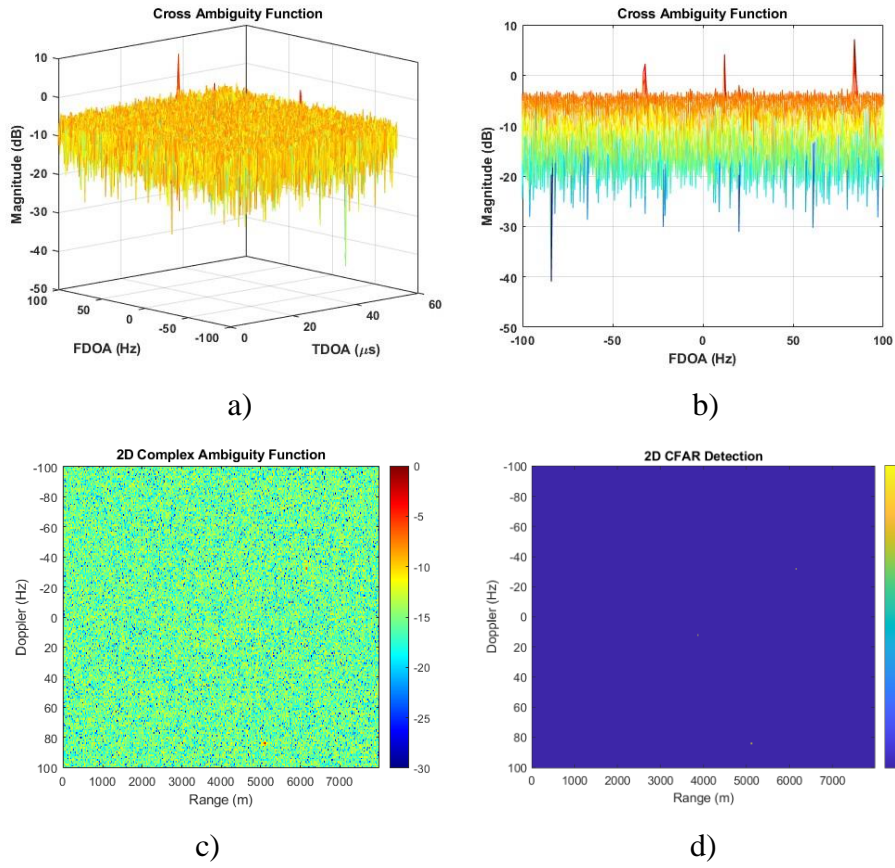


Figura A - V - 17. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 8$  s).

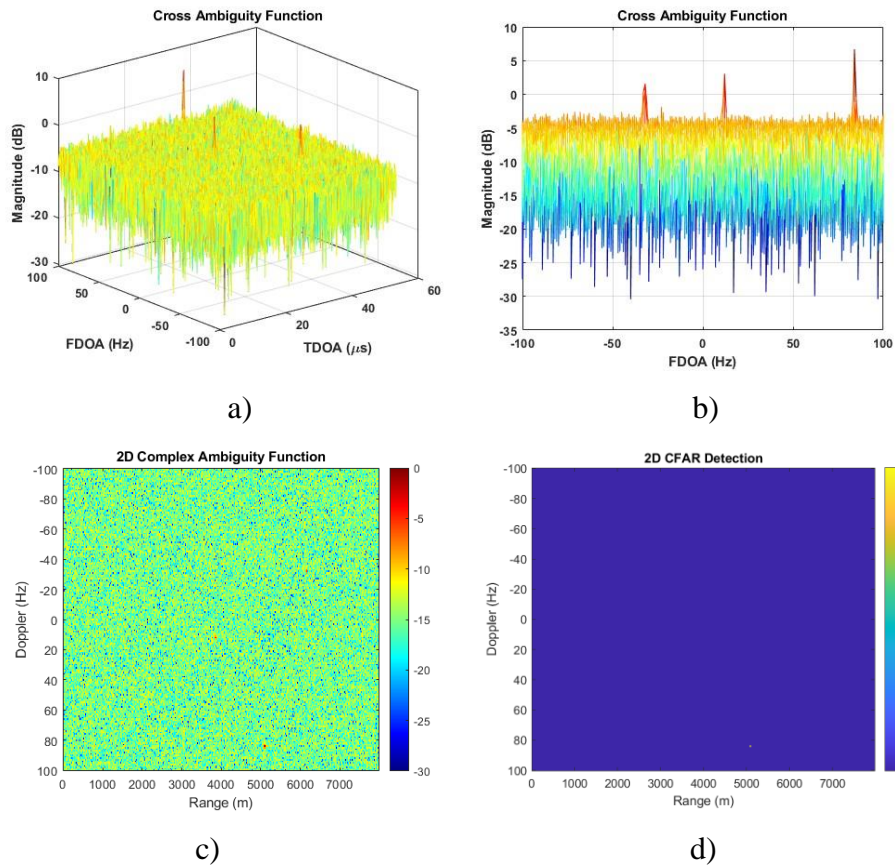


Figura A - V - 18. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 9$  s).

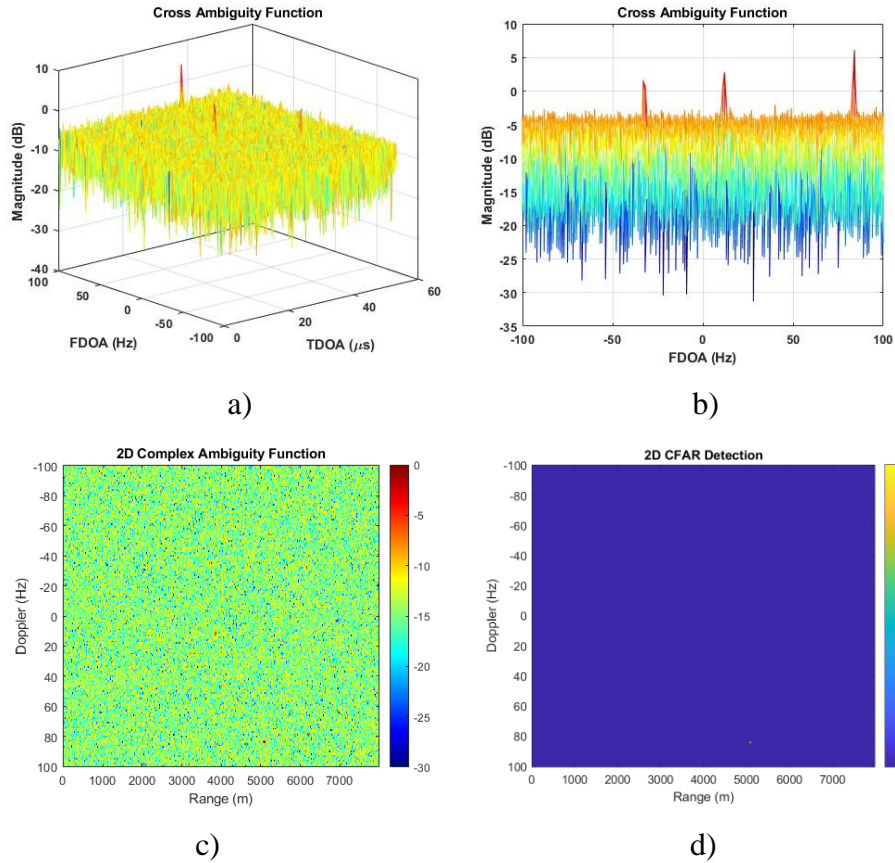


Figura A - V - 19. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 10$  s).

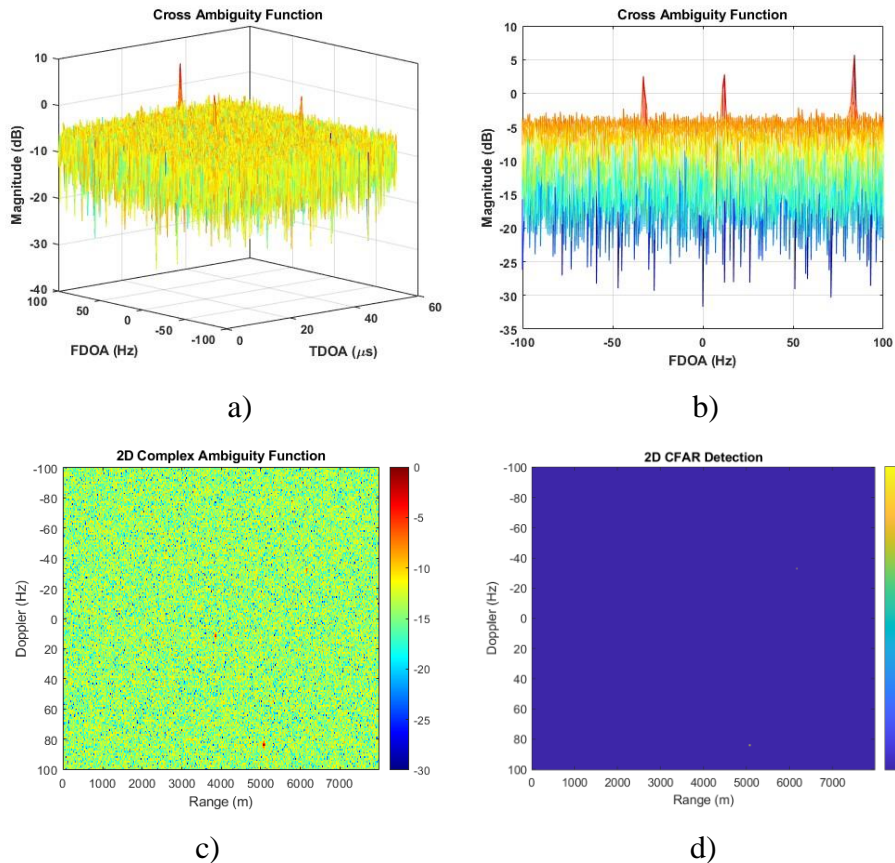


Figura A - V - 20. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 11$  s).

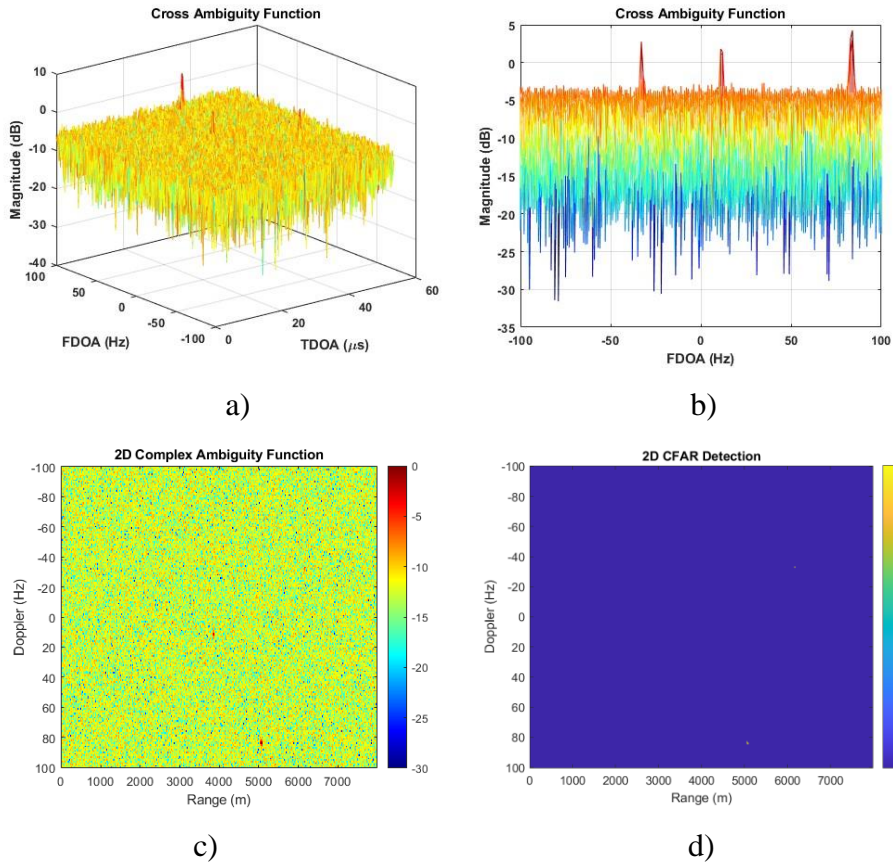


Figura A - V - 21. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 12$  s).

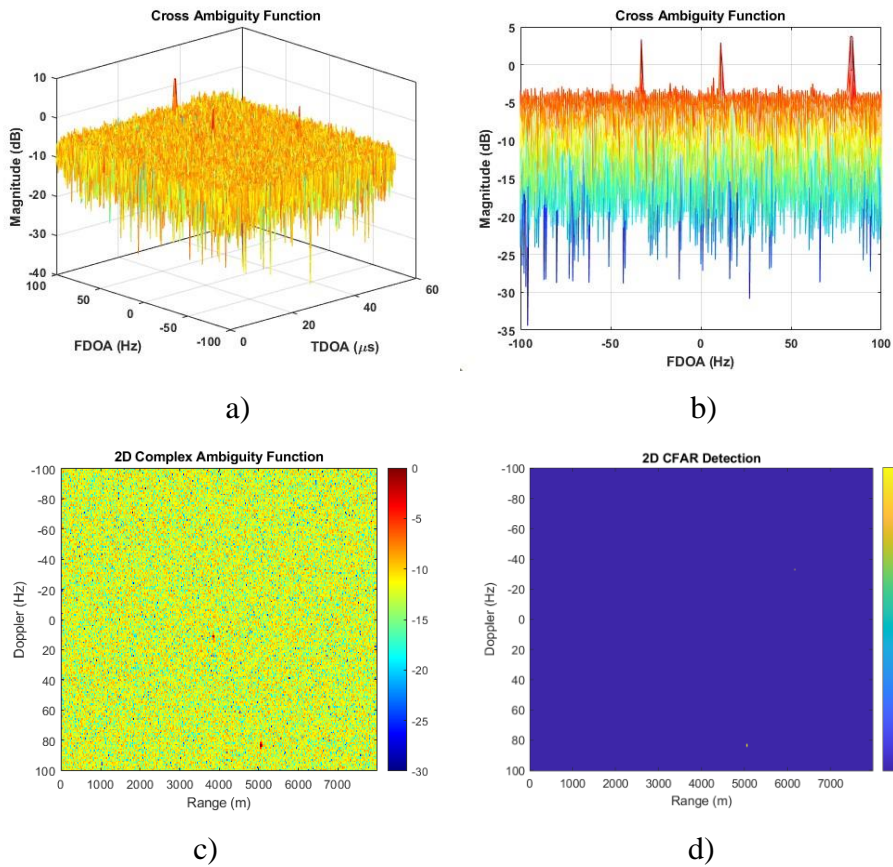


Figura A - V - 22. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 13$  s).

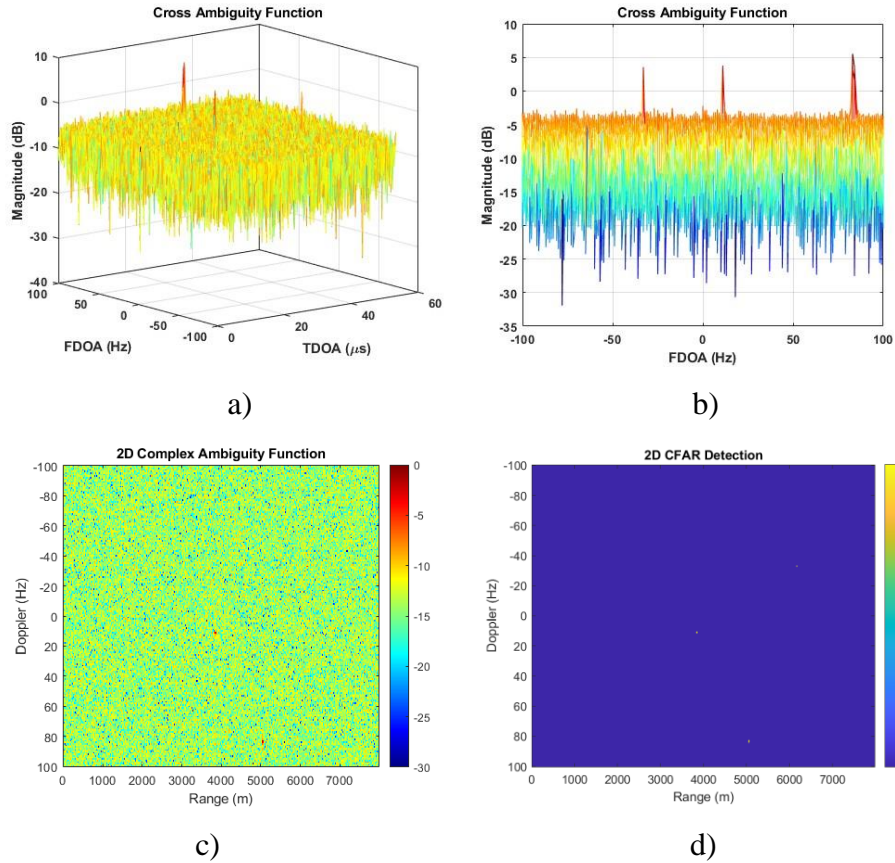


Figura A - V - 23. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 14$  s).

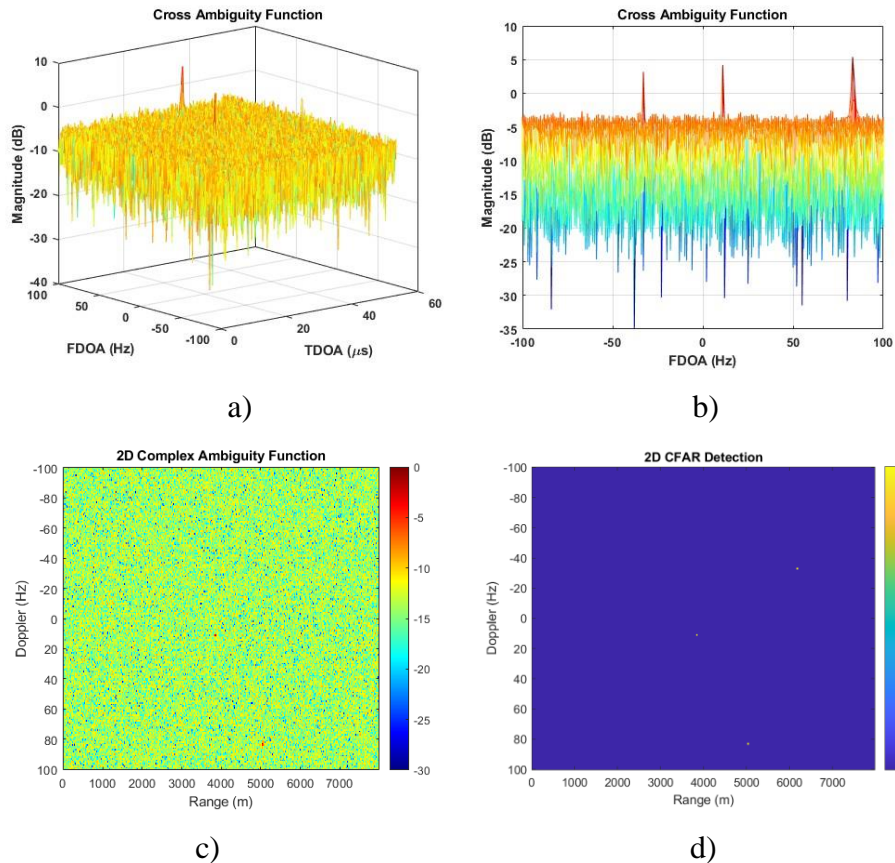
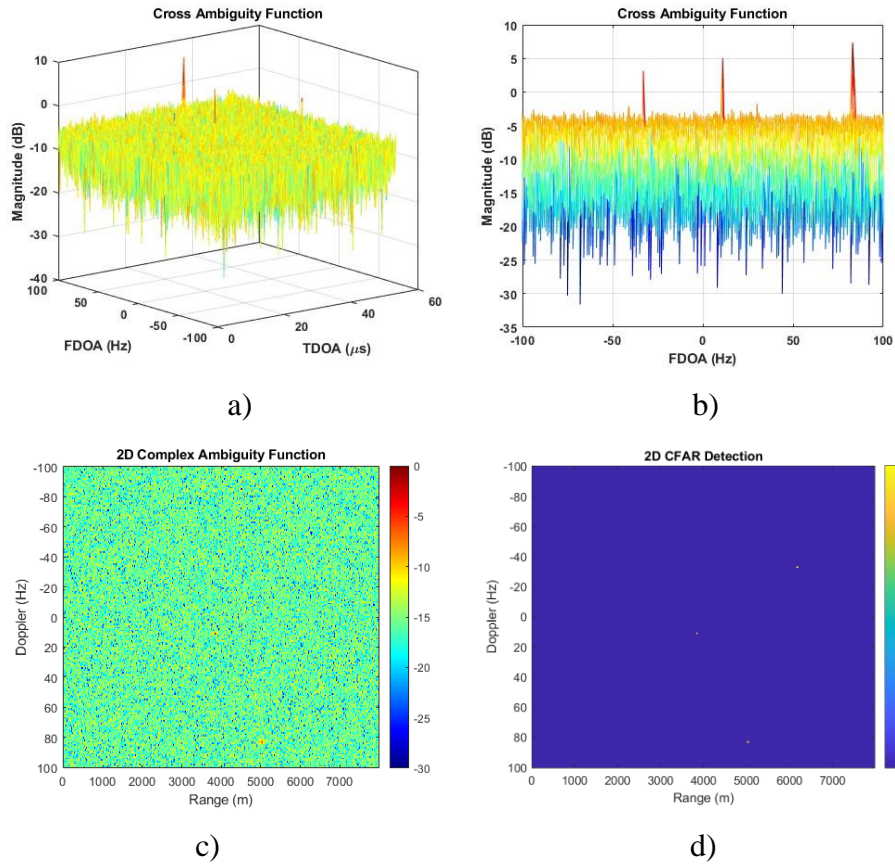
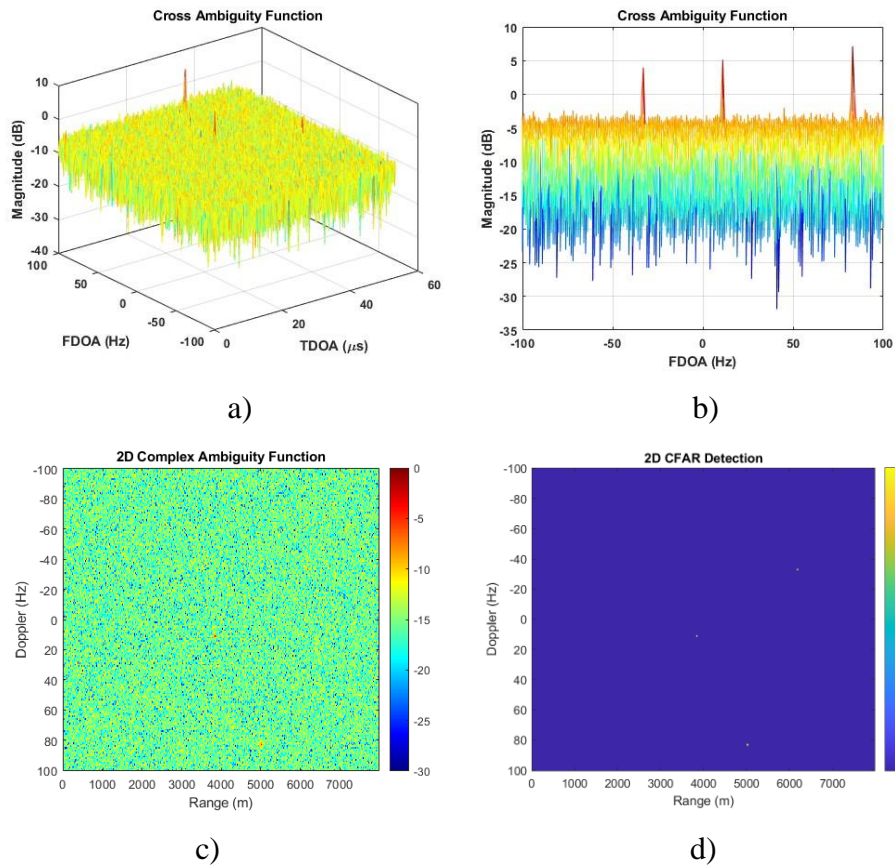


Figura A - V - 24. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 15$  s).



**Figura A - V - 25. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 16$  s).**



**Figura A - V - 26. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 17$  s).**

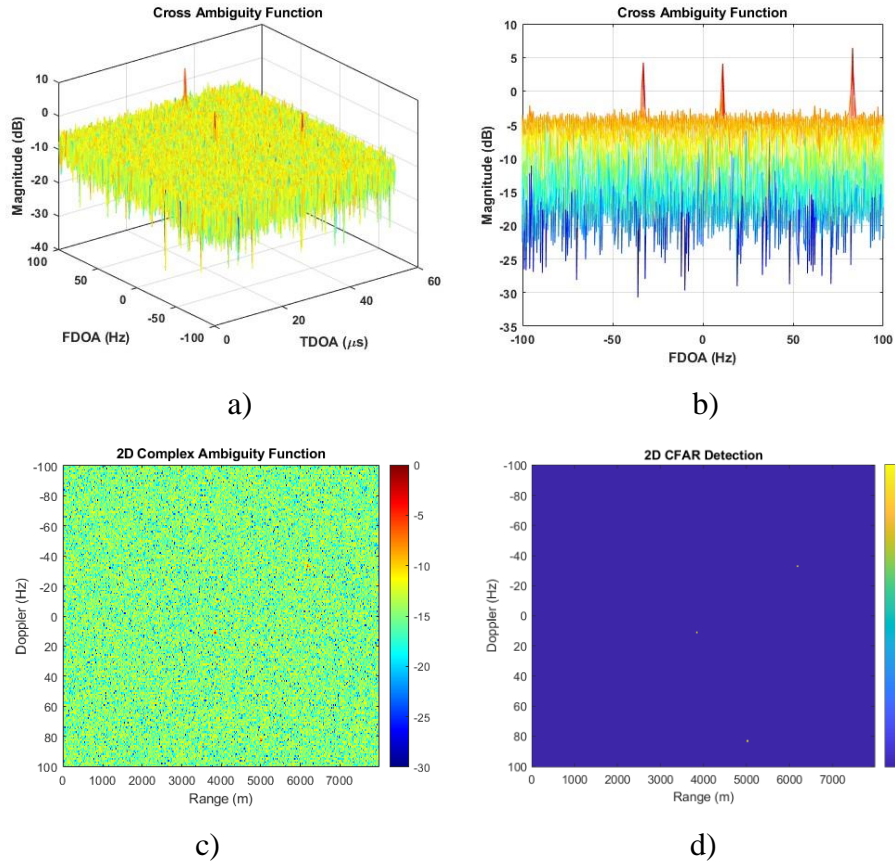


Figura A - V - 27. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 18$  s).

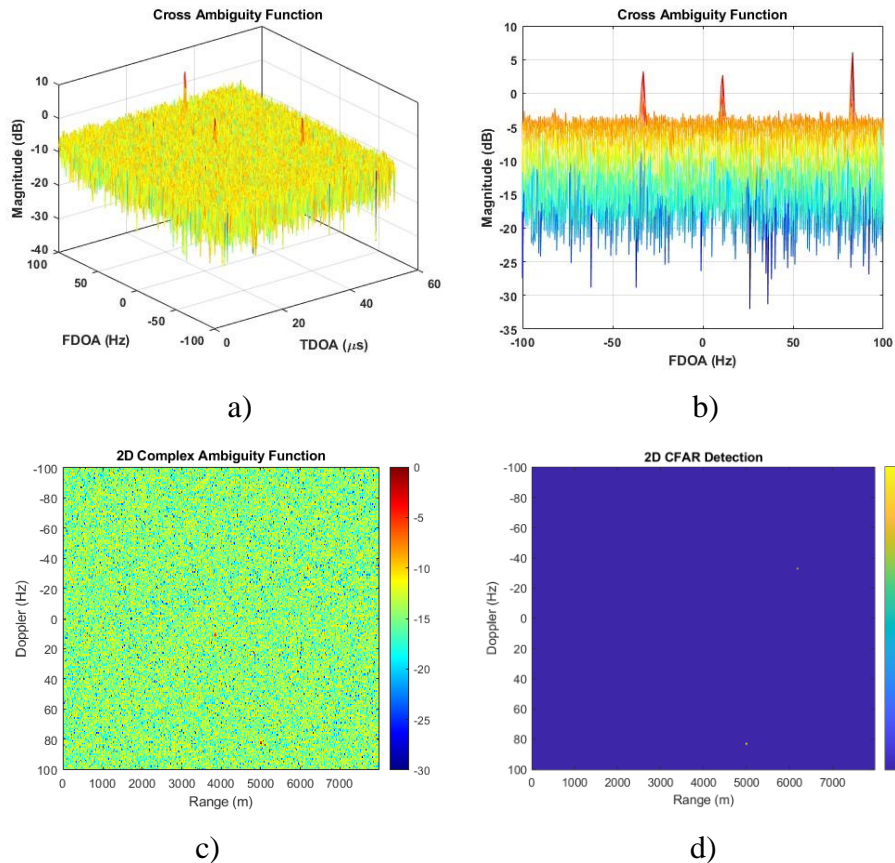


Figura A - V - 28. Contacto con RCS -30 dBsm ( $t = 19$  s).

## ANEXO VI: RESULTADOS MEDIDAS REALES.

En este anexo se recogen los resultados con las diferentes medidas de CPI para estimar la SNR.

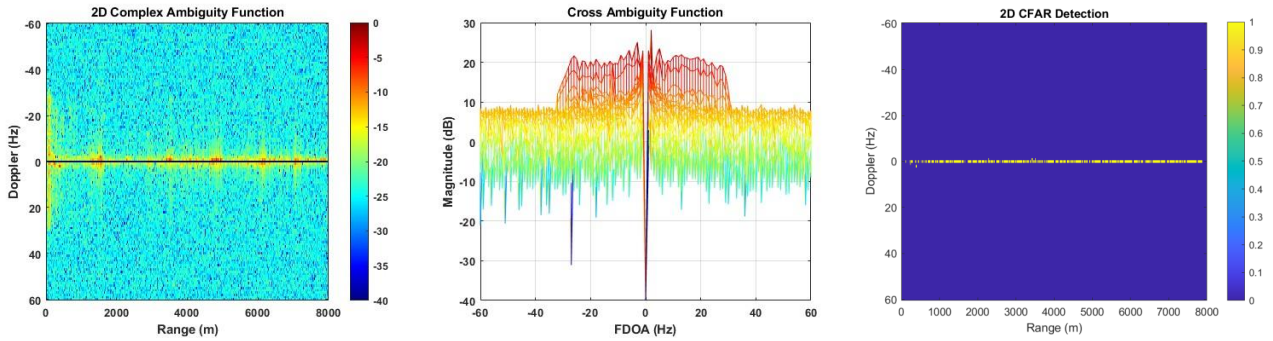


Figura A - VI - 1. CPI de un segundo ( $t=1s$ ).

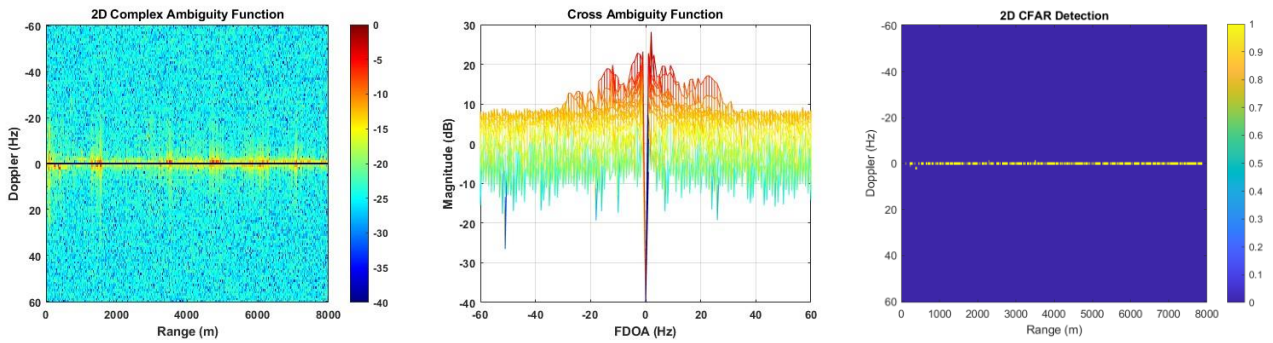


Figura A - VI - 2. CPI de un segundo ( $t=2s$ ).

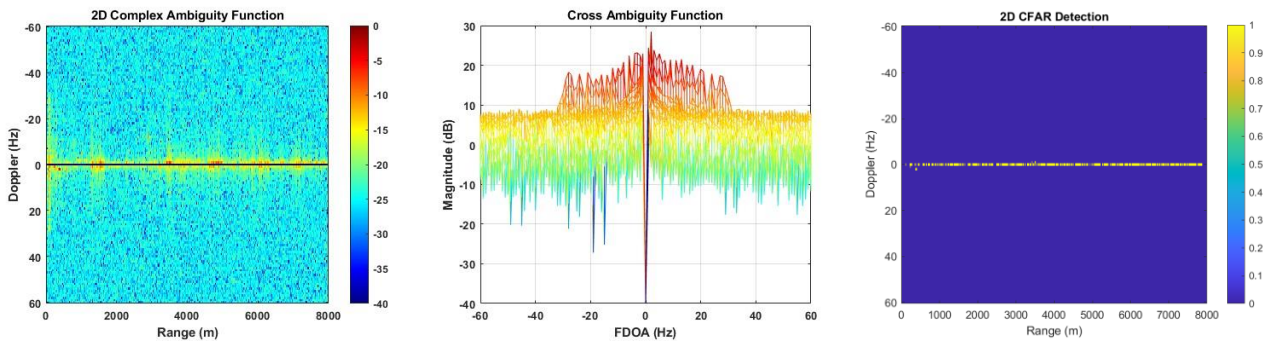


Figura A - VI - 3. CPI de un segundo ( $t=3s$ ).

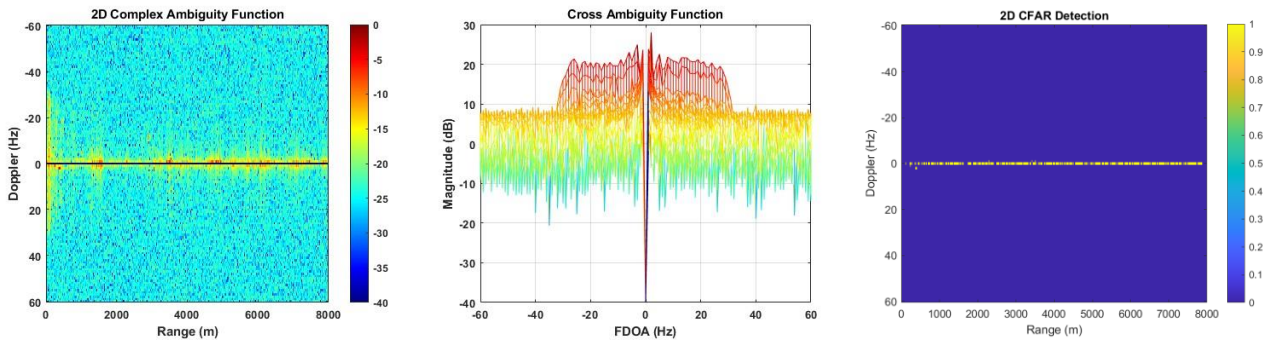


Figura A - VI - 4. CPI de un segundo ( $t=4s$ ).

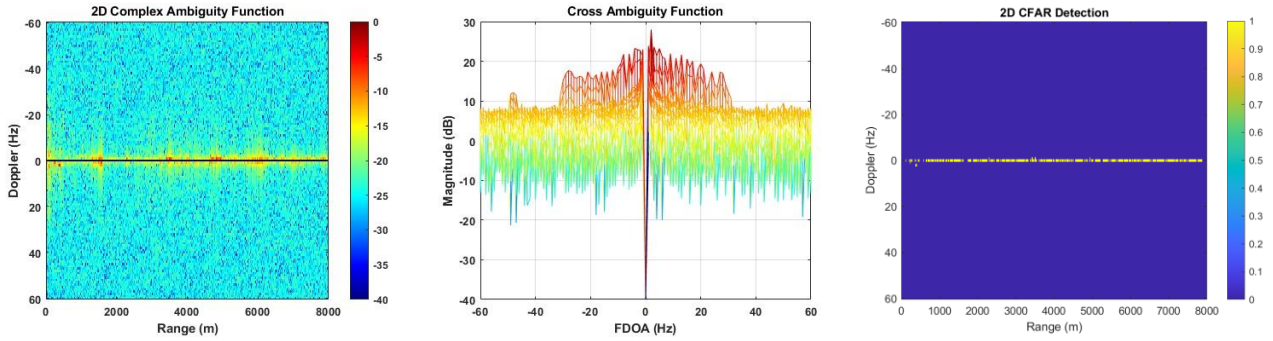


Figura A - VI - 5. CPI de un segundo ( $t=5s$ ).

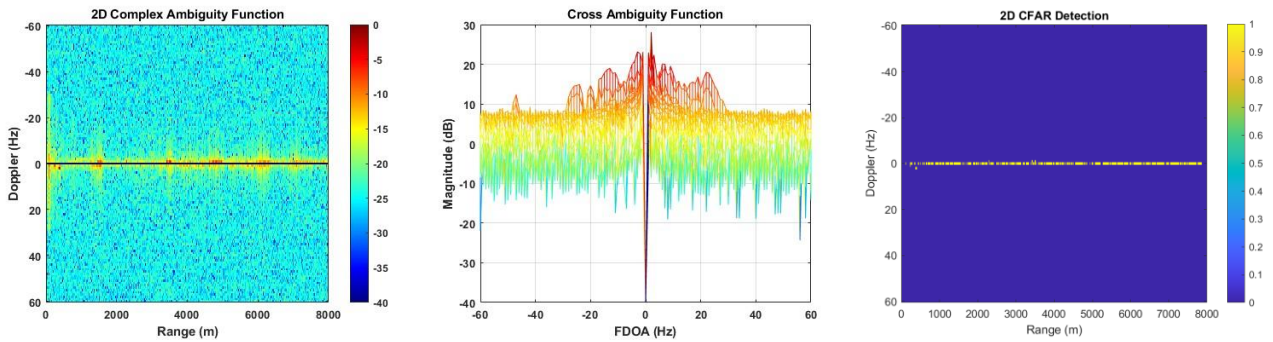


Figura A - VI - 6. CPI de un segundo ( $t=6s$ ).

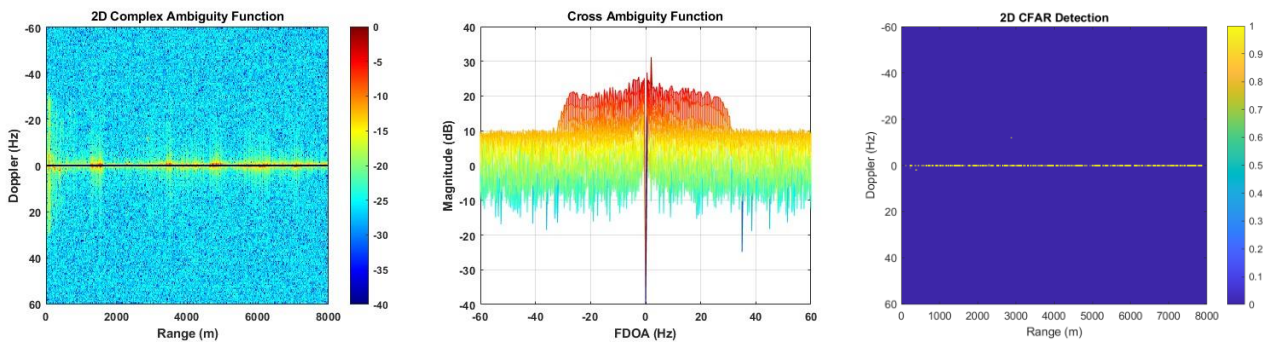


Figura A - VI - 7. CPI de dos segundos ( $t=1s$ ).

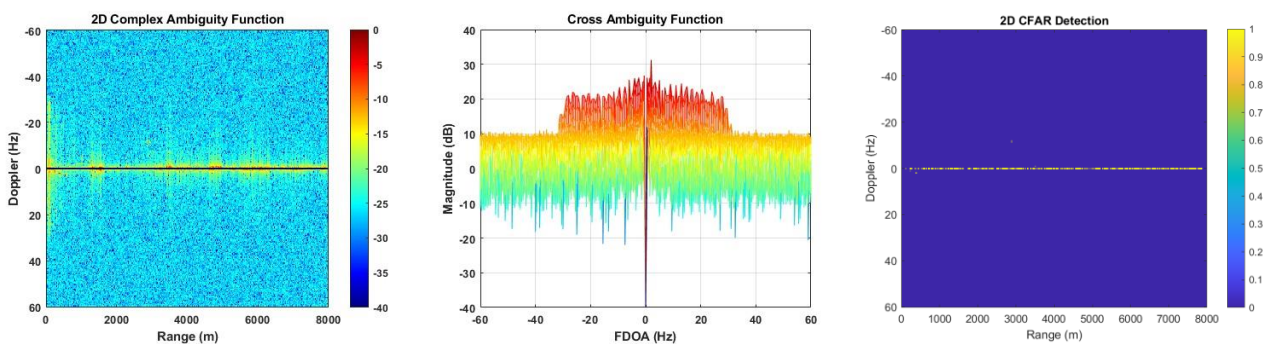


Figura A - VI - 8. CPI de dos segundos ( $t=3s$ ).

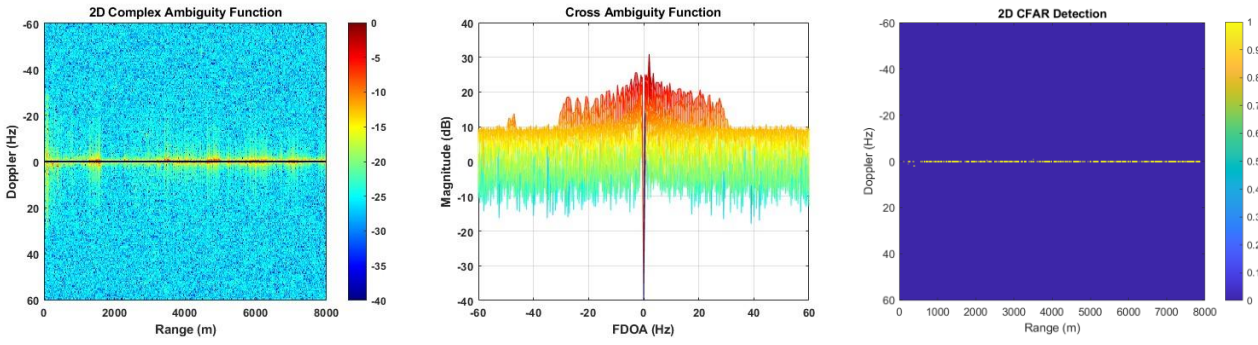


Figura A - VI - 9. CPI de dos segundos ( $t=5s$ ).

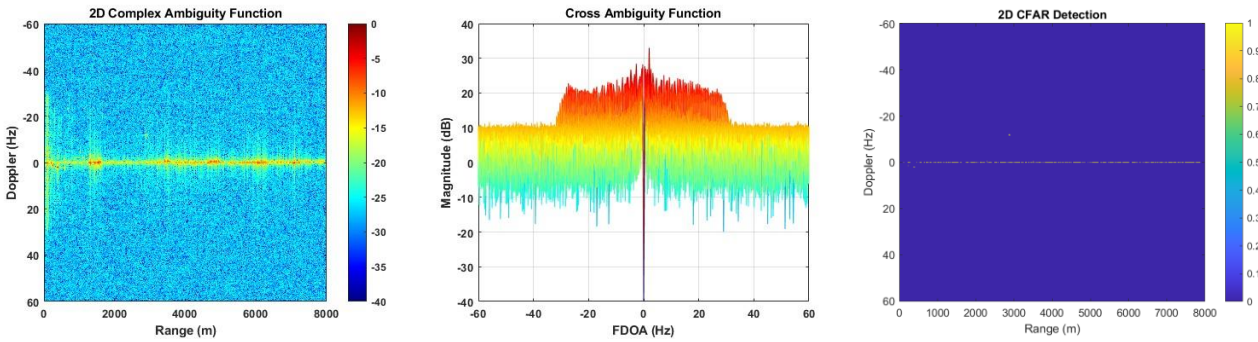


Figura A - VI - 10. CPI de tres segundos ( $t=1s$ ).

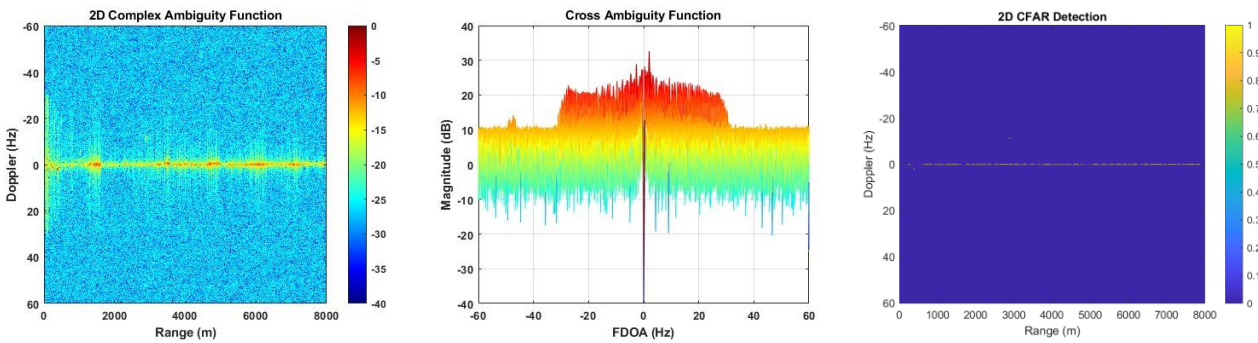


Figura A - VI - 11. CPI de tres segundos ( $t=4s$ ).

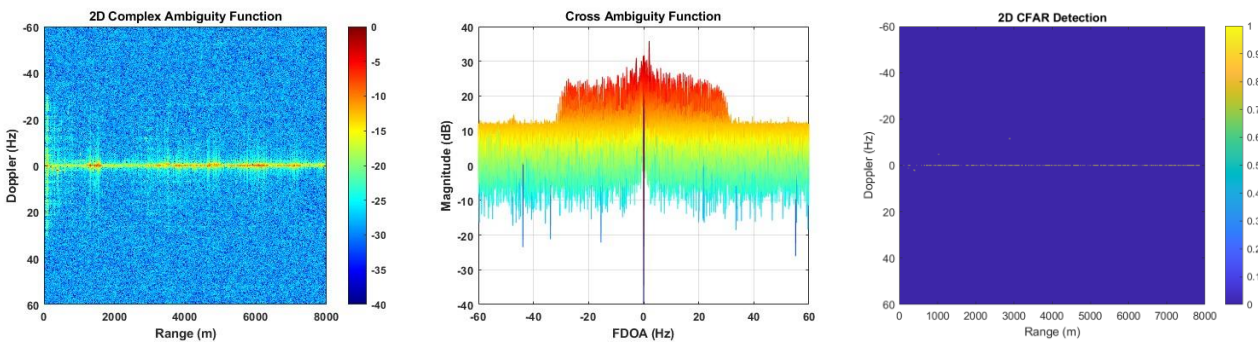


Figura A - VI - 12. CPI de seis segundos.

## ANEXO VII: REPRESENTACIÓN DE LOS ÓVALOS DE CASSINI.

La SNR (Signal Noise Ratio) obtenida de la detección de un contacto dependerá de su situación, más concretamente, el óvalo de Cassini en el que se encuentren. Esto puede comprobarse en la ecuación ( 3-10 ) y, por lo tanto, en la ecuación ( 3-9 ). En la Figura A - VII - 1 puede observarse la disminución de este valor a medida que se el contacto se separa de cualquiera de los dos focos (transmisor o receptor).

La Figura A - VII - 1 representa los óvalos de Cassini reales existentes en el escenario en el que se han llevado a cabo las mediciones de este trabajo. El transmisor situado en Poio, Pontevedra y los receptores de la ENM, son los focos de los óvalos.

La representación se encuentra normalizada con un valor de SNR igual a 0 dB (valor igual a uno en unidades naturales) cuando el contacto se encuentra en la misma posición que el transmisor o el receptor, es decir, en alguno de los focos. Cuanto más lejos se encuentre el contacto, proporcionando un valor de la ecuación ( 3-10 ) mayor, más negativa (menor) es la SNR (ecuación ( 3-9 )), por lo que más complicada será la detección.

A continuación, se describe el código informático empleado en Matlab para la realización de la Figura A - VII - 1.

```
function plot_SNR_Cassini_Passive(Tx, Rx, sigma, P_t, lambda, N)
% Función para calcular los óvalos de Cassini representando la SNR
% en un escenario de radar pasivo.
% Tx: [x, y] posición del transmisor
% Rx: [x, y] posición del receptor
% sigma: Sección equivalente radar (RCS) del blanco
% P_t: Potencia del transmisor (W)
% lambda: Longitud de onda de la señal (m)
% N: Potencia del ruido (W)
% Llamada a la función:
%plot_SNR_Cassini_Passive([3827,5277], [0 0], 1, 10000, 0.3,1e-15)
% Calcular la distancia entre el transmisor y el receptor
D = norm(Tx - Rx); % Distancia total entre transmisor y receptor
% Crear una malla de puntos para posibles ubicaciones del objetivo
range = D * 2; % Extensión de la malla basada en la distancia
puntos = 600; % Puntos para tomar medidas de SNR
[X, Y] = meshgrid(linspace(Tx(1)-range, Rx(1)+range, puntos), linspace(Tx(2)-range, Rx(2)+range, puntos));
% Calcular la distancia de cada punto al transmisor y al receptor
d_T = sqrt((X - Tx(1)).^2 + (Y - Tx(2)).^2); % Distancia Tx-Target
d_R = sqrt((X - Rx(1)).^2 + (Y - Rx(2)).^2); % Distancia Target-Rx
% Calcular la potencia recibida en el receptor considerando un
% escenario pasivo
P_r = P_t .* (lambda ./ (4 * pi * d_T)).^2 .* sigma .* (lambda ./ (4 * pi * d_R)).^2;
% Calcular la SNR en el receptor
SNR_dB = 10 * log10(P_r / N);
% Dibujar el mapa de contornos de SNR
figure;
contour(X, Y, SNR_dB, 'LineWidth', 2, 'ShowText', 'on', 'LevelList', [-48 -44 -40 -36 -32 -28 -24 -20 -16 -14 -12 -8 -2]);
colorbar;
hold on;
% Dibujar el transmisor y el receptor
plot(Tx(1), Tx(2), 'ro', 'MarkerSize', 10, 'MarkerFaceColor', 'r');
```

```

plot(Rx(1), Rx(2), 'bo', 'MarkerSize', 10, 'MarkerFaceColor', 'b');
% Ejes y título
legend('Óvalo de Cassini', 'Transmisor', 'Receptor');
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
title('Mapa de SNR en radar pasivo basado en óvalos de Cassini');
grid on;
axis equal;
set(gca, 'FontWeight', 'bold')
xlim([-6000 8000])
ylim([-4000 8000])
end

```

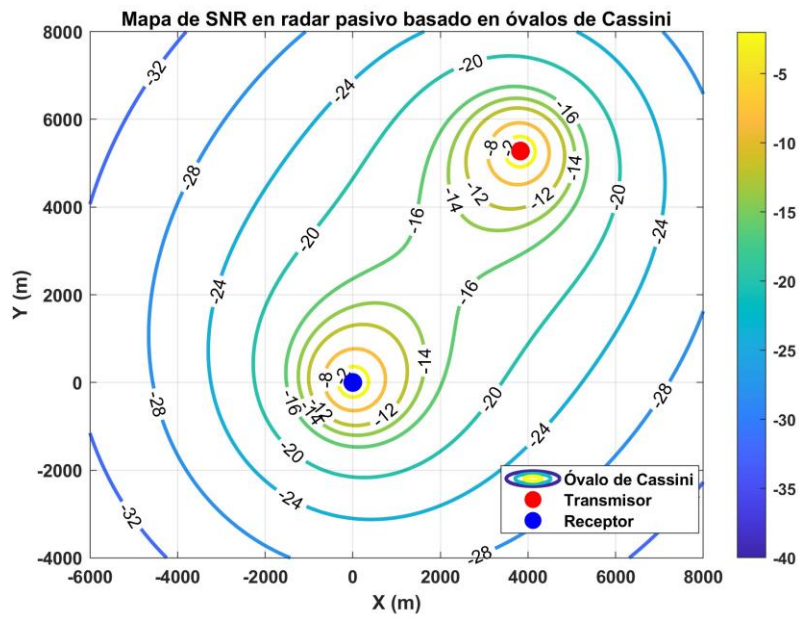


Figura A - VII - 1. Óvalos de Cassini.