



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

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Determinación de la posición de blancos marítimos en radar  
pasivo a partir de técnicas de beamforming*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Rafael Samaniego Ferrero

**DIRECTORES:** José María Núñez Ortuño  
Rubén Nocelo López

**CURSO ACADÉMICO:** 2022-2023

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de la posición de blancos marítimos en radar pasivo a partir de técnicas de beamforming*

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

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

El radar pasivo tiene sus orígenes en 1943 durante la Segunda Guerra Mundial, sin embargo, históricamente, el interés sobre esta tecnología sufrió una decadencia debido a la aparición del duplexor, que ensalzó la tecnología del radar activo. Actualmente, el interés por el desarrollo de sistemas de detección pasiva, ha resurgido de la mano de los departamentos de defensa por la ventaja táctica de su discreción, encontrándose en su pico histórico y, llegando a estar entre las líneas de I+D+I del Departamento de Defensa de España.

Basándose en el crecimiento de la importancia de estos sistemas, este trabajo busca indagar en el geoposicionamiento de blancos marítimos a través de detecciones pasivas, tomando como escenario la ría de Pontevedra. Por ello, a través del Software de MATLAB, se realizará la determinación de la posición de los blancos, a partir del rango biestático y el DOA proporcionados por la detección radar, y su posterior geo-representación.

La finalidad del presente proyecto, consiste en el estudio de los sistemas biestáticos pasivos, para continuar avanzando en la innovación de dicha tecnología, con el objetivo de hacer de esta tecnología, una realidad en un futuro a corto-medio plazo, aprovechando sus ventajas medioambientales como el ahorro de energía, y su ventaja táctica basada en su gran discreción.

## **PALABRAS CLAVE**

Radar pasivo, Rango biestático, DOA, Iluminador de oportunidad (IO), Línea base



# AGRADECIMIENTOS

Agradecer especialmente a mi familia y amigos (principalmente a la punta de lanza) que, de forma constante y continua, han estado siempre dándome el apoyo y el ánimo moral que tanta falta me ha hecho durante el desarrollo de este trabajo, sin importar su situación o condiciones en las que se encontrasen siempre me han sacado una sonrisa cuando más se necesitaba.

Quiero resaltar el importantísimo pilar que han supuesto los tutores en el desarrollo de este trabajo, por sus consejos orientaciones y correcciones, pero sobre todo, por estar siempre disponibles, incluso en horas fuera del horario, y recibir mis dudas y problemas con una actitud impregnada de motivación e ilusión.

Finalmente quiero agradecer a la promoción 423-153 a la que tanto me enorgullece pertenecer, y con la que he compartido toda una vida durante estos 5 años de singladura por la Escuela Naval Militar. A la promoción con la que siempre he podido compartir tanto las penurias como las alegrías y con la que tantos momentos he compartido, sin lugar a dudas, los mejores y los peores, pero siempre juntos. Espero que este vínculo no se rompa nunca.





## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Contenido .....  | 1  |
| Índice de Figuras .....  | 3  |
| Índice de Tablas.....  | 6  |
| 1 Introducción y objetivos .....   | 7  |
| 1.1 Introducción y motivación .....                                      | 7  |
| 1.2 Objetivos .....  | 8  |
| 1.3 Estructura del trabajo .....   | 8  |
| 2 Estado del arte .....  | 11 |
| 2.1 Desarrollo del radar pasivo a través de la historia .....            | 11 |
| 2.1.1 Inicios del radar, Sir Robert Watson-Watt .....                    | 11 |
| 2.1.2 Aparición del radar pasivo.....                                    | 12 |
| 2.1.3 Decadencia del radar pasivo, el duplexor .....                     | 13 |
| 2.1.4 Reparición del interés en el radar pasivo hasta la actualidad..... | 14 |
| 2.2 Líneas I+D+I de interés para la Defensa.....                         | 15 |
| 2.2.1 Líneas de acción .....   | 16 |
| 2.3 Principio de funcionamiento del radar pasivo.....                    | 19 |
| 2.3.1 Diferencia del tiempo de llegada de las señales (TDOA).....        | 20 |
| 2.3.2 Procesamiento de señales .....                                     | 22 |
| 2.4 Iluminadores de oportunidad .....                                    | 23 |
| 2.4.1 Clasificación de los IO.....                                       | 23 |
| 2.4.2 Modulación de las transmisiones.....                               | 24 |
| 2.5 Procesamiento de las señales recibidas .....                         | 25 |
| 2.5.1 Correlación cruzada .....  | 26 |
| 2.5.2 Proceso de detección en PCL .....                                  | 26 |
| 2.5.3 Seguimiento distancia/Doppler.....                                 | 28 |
| 3 Desarrollo del TFG.....  | 30 |
| 3.1 Fundamentos iniciales.....   | 30 |
| 3.1.1 Geometría biestática .....   | 30 |
| 3.1.2 Resolución biestática en distancia .....                           | 33 |
| 3.1.3 Determinación de la frecuencia Doppler biestática .....            | 34 |
| 3.1.7 Cobertura radar del sistema biestático.....                        | 36 |
| 3.2 Determinación de la posición de blancos.....                         | 36 |
| 3.2.1 Datos iniciales.....   | 36 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.2 Método empleado .....   | 38 |
| 3.2.2.1 DOA respecto a la línea base.....                               | 39 |
| 3.2.2.2 Ángulo entre la recta Rx-blanco y la línea base .....           | 40 |
| 3.2.2.3 Ecuaciones de la elipse, la recta e intersección .....          | 41 |
| 3.3 Geolocalización de blancos.....                                     | 44 |
| 3.4 Escenarios simulados .....  | 46 |
| 3.4.1 Escenario inicial.....  | 47 |
| 3.4.2 Escenario final .....   | 47 |
| 4 Resultados / Validación / Prueba.....                                 | 49 |
| 4.1 Resultados y análisis de las simulaciones .....                     | 49 |
| 4.1.1 Resultados escenario inicial.....                                 | 49 |
| 4.1.2 Resultados escenario final .....                                  | 51 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                                   | 53 |
| 5.1 Conclusiones y cumplimiento de los objetivos.....                   | 53 |
| 5.2 Líneas futuras.....   | 54 |
| 5.2.1 Varios IO en la ría de Pontevedra.....                            | 54 |
| 5.2.2 Sistemas biestáticos pasivos integrados en buques de guerra ..... | 54 |
| 6 Bibliografía.....   | 56 |
| Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales .....  | 60 |
| Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....                           | 62 |
| Anexo III: Código empleado.....   | 63 |
| Anexo IV: Método alternativo para la determinación de blancos.....      | 66 |
| Anexo V: Datos de la simulación final .....                             | 68 |
| Anexo VI: Función de ambigüedad y procesamiento CFAR.....               | 73 |
| Anexo VII: Representación sobre OpenCPN.....                            | 78 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 Esquema sinóptico TFG [AP].....  | 9  |
| Figura 2-1 Sir Watson-Watt [1].....   | 11 |
| Figura 2-2 Mapa Geopolítico Europa 1915 [3].....  | 11 |
| Figura 2-3 Radares “Chain Home” [6].....  | 12 |
| Figura 2-4 Radares “Klein Heidelberg” y Uso de “Chain Home” [8].....                                | 12 |
| Figura 2-5 Emplazamientos de “Klein Heidelberg” [10].....   | 13 |
| Figura 2-6 Funcionamiento del duplexor en radar pulsado [11].....                                   | 14 |
| Figura 2-7 Ficha técnica del desarrollo del “Silent Sentry” [14].....                               | 15 |
| Figura 2-8 HA 100 Passive Radar [16].....   | 15 |
| Figura 2-9 Navantia, ejemplo de contribución a la industria nacional [18].....                      | 16 |
| Figura 2-10 Promotores del proyecto IDEPAR [20] [21].....   | 17 |
| Figura 2-11 Modelo geométrico del empleo de técnicas ISAR [23].....                                 | 17 |
| Figura 2-12 MQ-9 Reaper en lanzamiento de misil[24].....  | 17 |
| Figura 2-13 Campus La Marañososa y Torrespaña (iluminador de oportunidad) [26] [27].....            | 18 |
| Figura 2-14 Distancia Torregorda-TV Jerez (26km) [28].....  | 18 |
| Figura 2-15 Dron modelo “Phantom” [29].....   | 19 |
| Figura 2-16 Esquema radar biestático (izq.) y monoestático (der.) [31].....                         | 19 |
| Figura 2-17 Esquema recepción de la señal directa y de vigilancia [30].....                         | 20 |
| Figura 2-18 Esquema del sistema biestático de un radar pasivo [AP].....                             | 20 |
| Figura 2-19 Determinación del blanco a través de tres elipses asociadas a tres iluminadores [AP]21  | 21 |
| Figura 2-20 Determinación de blanco mediante elipse y DOA [AP].....                                 | 21 |
| Figura 2-21 Esquema del procesamiento de las señales [AP].....                                      | 23 |
| Figura 2-22 Estaciones terrestres de transmisión [32].....  | 23 |
| Figura 2-23 Satélites espaciales como iluminadores de oportunidad [33].....                         | 24 |
| Figura 2-24 Esquema ejemplo del DVB-SH [41].....  | 25 |
| Figura 2-25 Ruido blanco aditivo siguiendo una distribución normal, Gaussiano [47].....             | 27 |
| Figura 2-26 Representación del Clutter común [48].....  | 27 |
| Figura 2-27 Ciclo del proceso del uso del filtro Kalman [52].....                                   | 28 |
| Figura 2-28 División del espacio en los Polígonos de Voronoi [53].....                              | 28 |
| Figura 3-1 Esquema genérico en la detección de un blanco en un sistema biestático [AP].....         | 30 |
| Figura 3-2 Esquema genérico de una elipse [54].....   | 31 |
| Figura 3-3 Representación de un elipsoide [55].....   | 32 |
| Figura 3-4 Ortogonalidad entre la tangente de la elipse y la mediatriz del ángulo biestático [30].. | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-5 Ejemplo de resolución en distancia de un radar pulsado [57] [56] .....                 | 33 |
| Figura 3-6 Compresión de pulso con LFM (izq.) y códigos Barker (der.) [58].....                   | 33 |
| Figura 3-7 Diferencia entre $\delta R_{bist}$ y $\delta R_{pseudo}$ [30].....                     | 34 |
| Figura 3-8 Ejemplo de Doppler 0 por cancelación de Doppler [AP].....                              | 35 |
| Figura 3-9 Ejemplo de Doppler 0 por nula variación de la distancia biestática [AP].....           | 35 |
| Figura 3-10 Situación geográfica del sistema biestático empleado [61].....                        | 37 |
| Figura 3-11 Tablas de varios CPIs (izq.) y de un mismo intervalo con varios blancos (der.) [AP]   | 38 |
| Figura 3-12 Ejemplo de línea base sin inclinación [AP].....                                       | 39 |
| Figura 3-13 Ejemplo de línea base con inclinación sobre la horizontal [AP].....                   | 39 |
| Figura 3-14 Cálculo de $\theta$ con inclinación de la línea base [AP] .....                       | 40 |
| Figura 3-15 Cálculo de $\theta$ sin inclinación de la línea base [AP] .....                       | 41 |
| Figura 3-16 Representación gráfica de las dos posibles soluciones de Ec. (3.17) [AP] .....        | 42 |
| Figura 3-17 Representación de la solución de Ec. (3.17) según su posición en la elipse [AP] ..... | 43 |
| Figura 3-18 Signo del $\cos(\theta)$ según el valor de $\theta$ [AP] .....                        | 43 |
| Figura 3-19 Coordenadas "X" e "Y" respecto de la línea base .....                                 | 43 |
| Figura 3-20 Coordenadas terrestres del receptor e IO [AP].....                                    | 44 |
| Figura 3-21 Diferencia gráfica entre " $\theta$ " y " $\Phi$ " [AP].....                          | 44 |
| Figura 3-22 Ejemplo de la obtención de las coordenadas "X" e "Y" [AP].....                        | 45 |
| Figura 3-23 Diferencia del valor de la longitud en función de la latitud [62].....                | 45 |
| Figura 3-24 Escenario inicial [AP].....   | 47 |
| Figura 3-25 Escenario final [AP] .....  | 48 |
| Figura 4-1 Mapa satélite, resultados del escenario inicial [AP].....                              | 49 |
| Figura 4-2 Comparativa de rumbos del escenario inicial [AP].....                                  | 50 |
| Figura 4-3 Mapa satélite, resultados del escenario final [AP] .....                               | 51 |
| Figura 4-4 Comparativa de rumbo del escenario final [AP] .....                                    | 51 |
| Figura A4-0-1 Situación genérica con inclinación de línea base y orientación de antena [AP] ..... | 66 |
| Figura A6-0-1 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-1 [AP] .....                         | 73 |
| Figura A6-0-2 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-10 [AP] .....                        | 73 |
| Figura A6-0-3 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-20 [AP] .....                        | 74 |
| Figura A6-0-4 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-30 [AP] .....                        | 74 |
| Figura A6-0-5 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-40 [AP] .....                        | 74 |
| Figura A6-0-6 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-50 [AP] .....                        | 75 |
| Figura A6-0-7 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-60 [AP] .....                        | 75 |
| Figura A6-0-8 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-70 [AP] .....                        | 75 |
| Figura A6-0-9 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-80 [AP] .....                        | 76 |
| Figura A6-0-10 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-90 [AP] .....                       | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Figura A6-0-11 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-100 [AP] .....        | 76 |
| Figura A6-0-12 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-110 [AP] .....        | 77 |
| Figura A6-0-13 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-120 [AP] .....        | 77 |
| Figura A6-0-14 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-125 [AP] .....        | 77 |
| Figura A7-0-1 Representación OpenCPN del primer intervalo de detecciones [AP] ..... | 79 |
| Figura A7-0-2 Corroboración del posicionamiento de los blancos en OpenCPN [AP]..... | 80 |
| Figura A7-0-3 Evolución espacio-temporal del Target 3 en OpenCPN [AP].....          | 80 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3-1 Ejemplo datos de partida de un mismo contacto ..... | 37 |
| Tabla 4-1 Comparación distancias: escenario inicial .....     | 50 |
| Tabla 4-2 Comparación distancias: escenario final.....        | 52 |
| Tabla A5-1 Datos CPI-1 .....                                  | 68 |
| Tabla A5-2 Datos CP1-10 .....                                 | 68 |
| Tabla A5-3 Datos CPI-20 .....                                 | 69 |
| Tabla A5-4 Datos CP1-30 .....                                 | 69 |
| Tabla A5-5 Datos CP1-40 .....                                 | 69 |
| Tabla A5-6 Datos CP1-50 .....                                 | 70 |
| Tabla A5-7 Datos CP1-60 .....                                 | 70 |
| Tabla A5-8 Datos CP1-70 .....                                 | 70 |
| Tabla A5-9 Datos CP1-80 .....                                 | 71 |
| Tabla A5-10 Datos CP1-90 .....                                | 71 |
| Tabla A5-11 Datos CP1-100 .....                               | 71 |
| Tabla A5-12 Datos CP1-110 .....                               | 72 |
| Tabla A5-13 Datos CP1-120 .....                               | 72 |
| Tabla A5-14 Datos CP1-125 .....                               | 72 |

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y motivación

Los sistemas de Localización Coherente Pasiva (PCL), han estado recibiendo un gran interés en los ámbitos académico y militar durante las últimas décadas. Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, el interés en los radares biestáticos ha resultado seguir una trayectoria cíclica, con una periodicidad de entorno 15 o 20 años. Los sistemas de radar pasivo, conforman sistemas biestáticos debido a que transmisor y receptor no comparten emplazamiento. El interés en PCL, se encuentra actualmente en un pico duradero debido, principalmente, a la tecnología emergente. Esta tecnología se ha desarrollado lo suficiente como para que los distintos Departamentos de Defensa, de múltiples Gobiernos vean los sistemas PCL como un sensor de gran potencial y futuro para la vigilancia.

Las características más atractivas del radar pasivo desde un punto de vista táctico y militar son:

- La discreción, pues permite realizar una vigilancia y seguimiento del entorno sin revelar la posición del sensor a través de emisiones radar, e impide ser detectado por la realización de dicha vigilancia.
- Las bandas de frecuencia utilizadas por los transmisores empleados a modo de iluminadores de oportunidad, (generalmente transmisores de difusión), operan en las bandas de VHF y UHF. Esta característica proporciona una ventaja en la capacidad de detección, ya que elude ciertas medidas adoptadas por los objetivos para evitar ser detectados. Al ser completamente pasivo, el despliegue del receptor no requiere asignación de frecuencia y permite la operación en áreas densamente pobladas, donde la "contaminación" electromagnética puede ser un problema.
- Ahorro de costes, el coste energético de la transmisión desaparece, así como se reduce en gran medida el mantenimiento necesario.

El sistema de detección basado en radar pasivo, está compuesto por transmisores de oportunidad y receptores, que deben ser específicamente adaptados para poder aprovechar las formas de onda transmitidas que, normalmente, no son óptimas para la detección radar. En la actualidad, existen unidades de procesamiento muy potentes capaces de soportar el procesamiento radar requerido (ejemplos de este procesamiento es la correlación cruzada, supresión de señal directa y reconstrucción de señal directa en el caso de formas de onda digitales).

Durante los últimos años, se ha observado un incremento de la cantidad de enfoques en el procesamiento de señales. El principal impulsor de la mayoría de las investigaciones y desarrollos viene de la mano de la aplicación militar de vigilancia aérea. A pesar de ello, se están abordando aplicaciones

específicas en el ámbito marítimo y el mundo civil, haciendo uso de los iluminadores disponibles y evitando una mayor saturación del espectro.

La investigación de este campo suscita especial interés al observar que el desarrollo e investigación de esta tecnología, se encuentra entre las líneas de acción de I+D+I del Ministerio de Defensa. De tal forma, en la actualidad, ya se están conduciendo distintos experimentos con la intención de hacer de esta tecnología una realidad favorable.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo, es la obtención de la posición unívoca de los blancos detectados a través del sistema de radar pasivo con antena receptora tipo “array”. Este sistema proporciona dos datos fundamentales: el conocido como rango biestático y el ángulo de llegada de la señal recibida. Por lo tanto, durante el desarrollo del trabajo se estudiarán las posibilidades de procesamientos de ambos datos en el entorno de MATLAB, para poder obtener un dato fidedigno acerca la posición del blanco.

Además, se tratará de representar las posiciones obtenidas en coordenadas cartesianas, buscando plasmar, sobre un mapa satélite, la geolocalización de los blancos, y su evolución en los dominios espacial y temporal. Lo último con el objetivo primario de obtener una mayor facilidad en el análisis de los datos, y un primer acercamiento a una hipotética interfaz de usuario.

Como objetivo secundario, se pretende poner en relevancia la importancia que pueden llegar a alcanzar estos sistemas y las líneas de interés que se ciernen sobre esta tecnología, buscando su innovación y mejora. Por otro lado, también se busca contextualizar dicha tecnología dentro de un marco histórico, y presentar las nociones y principios fundamentales que rigen su comportamiento y utilidad al momento de realizar las detecciones.

## 1.3 Estructura del trabajo

Con el propósito de hacer más comprensible el contenido del trabajo y lograr una visión organizada de los temas que aquí se abordan, se ha organizado su estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 1- Introducción y objetivos: en este apartado se tiene el propósito de resumir las razones que impulsaron la elaboración y desarrollo del trabajo, así como los objetivos que se persiguen a lo largo del mismo. Además, se detalla la estructura adoptada para su presentación, con la finalidad de mejorar la comprensión sobre el tema.
- Capítulo 2- Estado de arte: aquí, se comenzará contextualizando la tecnología de radar pasivo en el marco temporal desde sus inicios, pasando por su decadencia y su posterior resurgimiento hasta la actualidad. Se pondrá en relieve la importancia que presenta dentro del Ministerio de Defensa y cómo aborda este ministerio el desarrollo e investigación del tema en cuestión. Posteriormente, se tratarán los principios fundamentales que rigen estos sistemas, y los procesamientos que sufren las señales captadas por el receptor con el objetivo de conseguir la detección y seguimiento de los blancos. Finalmente se tratarán los iluminadores de oportunidad, clasificándolos y profundizando en las modulaciones de la señal.
- Capítulo 3- Geometría biestática: en este capítulo se busca profundizar en la elipse donde se encuentra el blanco y que es generada por una distancia biestática obtenida por el receptor. Se explican los fundamentos que rigen la elipse y sus propiedades.
- Capítulo 4- Frecuencia Doppler biestática: tal y como reza su nombre, este capítulo tratará de explicar la obtención de esta frecuencia que servirá de base para lograr la distancia biestática. También se explicarán ciertos casos en los que el sistema se presenta como “ciego”.



- Capítulo 5- Determinación de la posición de los blancos: explica el método empleado para conseguir dicho objetivo, así como los datos iniciales de los que se parte, como realizar su geolocalización, código empleado mediante el software de MATLAB y, finalmente, se expondrán los distintos escenarios sobre los que se ha puesto a prueba el método.
- Capítulo 6- Resultados y validación: mostrará los resultados de los escenarios obtenidos junto con los escenarios planteados, para permitir realizar la comparación y análisis de resultados.
- Capítulo 7- Conclusiones y líneas futuras: Por último, el objetivo de este capítulo es resumir y recopilar las principales ideas que se derivan del trabajo. Además, también se presentan posibles direcciones de investigación futura que puedan seguir la línea de este trabajo.

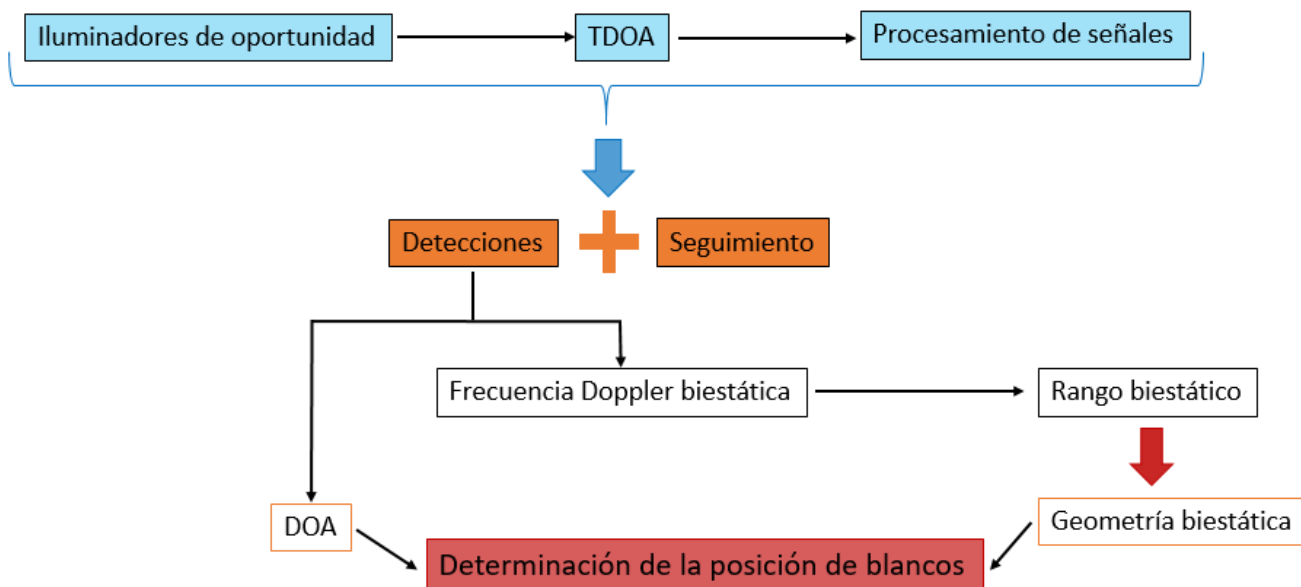


Figura 1-1 Esquema sinóptico TFG [AP]



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Desarrollo del radar pasivo a través de la historia

#### 2.1.1 Inicios del radar, Sir Robert Watson-Watt

La historia del radar tiene su origen en 1935 de la mano de Sir Robert Watson-Watt cuando llevó a cabo el conocido experimento de Daventry.

Sir Robert Watson-Watt fue un ingeniero y físico de origen escocés, descendiente directo de James Watt, conocido por ser el ingeniero creador de la primera máquina de vapor que dio paso a la Primera Revolución Industrial. Sir Robert, vivió durante la Primera Guerra Mundial, y era plenamente consciente del peligro que supusieron los bombarderos alemanes en aquel momento. Estos eran difícilmente detectables por su altura de vuelo y, más importante aún, por la corta distancia a recorrer entre Alemania y Reino Unido. En apenas 20 minutos, los bombarderos tenían la capacidad de posicionarse sobre territorio inglés. Por ello, la única forma de conseguir una detección efectiva consistía en mantener una patrulla permanente de cazas sobrevolando el espacio aéreo, lo cual era completamente inviable.



Figura 2-1 Sir Watson-Watt [1]

De esta forma, con la motivación de solventar el problema, el 12 de febrero de 1935 Sir Robert, envió un memorándum al ministerio bajo el título, "Detection and location of aircraft by radio methods" así, se solicitó una demostración práctica de este fundamento, para lo que surge el experimento Daventry [1] [2].



Figura 2-2 Mapa Geopolítico Europa 1915 [3]

Respecto a dicho experimento, Watson-Watt, valiéndose del transmisor Empire de la BBC de onda corta, consiguió en febrero de ese mismo año, la detección de un bombardero a 8 km [4]. Como consecuencia de los resultados positivos de este experimento, una serie de radares activos de potencia equivalente a 350 kW fueron instalados en las costas de la parte sur y este de Inglaterra. Dicha sucesión de radares de vigilancia aérea recibió el nombre de “Chain Home” [5]. El descubrimiento del radar como principal método de detección aérea, hizo que este se posicionara como un factor fundamental durante la Segunda Guerra Mundial, en contra de la Alemania Nazi.



Figura 2-3 Radares “Chain Home” [6]

### 2.1.2 Aparición del radar pasivo

Por su parte, Alemania, dándose cuenta de la relevante importancia de esta capacidad de detección, establece en 1943 la llamada “Klein Heidelberg”, que consiste en una cadena de radares similar a la británica, establecida sobre las costas alemanas del Canal de la Mancha. No obstante, estos radares se trataban de radares pasivos puesto que se valían de las emisiones activas de “Chain Home” para realizar su respectiva vigilancia aérea. De esta forma, se consolidaron como un sistema biestático con los radares británicos como la fuente transmisora [7]. Con esta contribución aparecen, por lo tanto, los primeros radares pasivos operativos, cuya principal ventaja era su enorme discreción, tal era la magnitud de dicha discreción, que los aliados no supieron de su existencia hasta tiempo después del desembarco de Normandía.

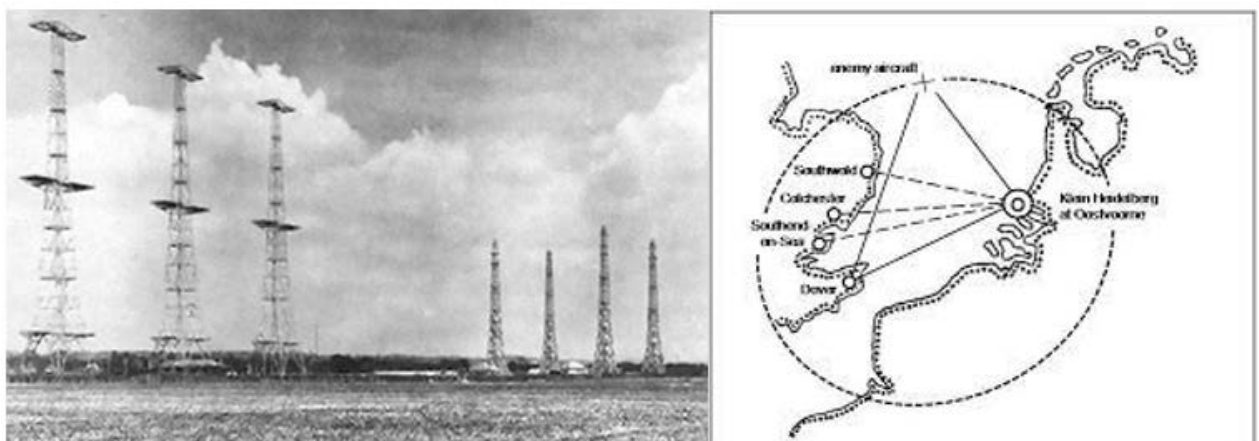


Figura 2-4 Radares “Klein Heidelberg” y Uso de “Chain Home” [8]

Este proyecto alemán llegó de la mano del Dr. Wächter, de la empresa alemana de aparatos electrónicos Telefunken, quien en 1942 junto con otros ingenieros de radio y, conociendo la posición exacta de los radares de los británicos (debido a que sus señales eran fácilmente rastreables), comenzó el desarrollo de este proyecto. Más tarde, en 1943, terminó materializándose en la creación de 7 emplazamientos de receptores en Limmen, Oostvoorne, Ostend, Boulogne, Abbeville, Cap d'Antifer y Cherbourg. El fundamento de estos radares pasivos, fue bastante similar al de los receptores de los radares de "Chain Home", incluso con la capacidad de determinar el ángulo de llegada de la señal reflejada en las aeronaves. Esta última capacidad, fue posible gracias al desarrollo de la idea de la realización de un barrido por parte de la antena, en el sector de búsqueda y un reconocimiento de la dirección del máximo de la intensidad recibida. Es cierto que la resolución angular resultó ser relativamente poco precisa por lo que se ideó un sistema de conmutación de lóbulos, sin embargo, este nunca entró en servicio [9].



Figura 2-5 Emplazamientos de "Klein Heidelberg" [10]

### 2.1.3 Decadencia del radar pasivo, el duplexor

Sin embargo, la popularidad del radar pasivo decayó debido a la aparición del duplexor, este elemento, permitió el desarrollo del radar activo monostático. Esto trajo consigo que, en los radares con duplexor, tanto el transmisor como el receptor se encontrasen en el mismo emplazamiento, a diferencia de los bistáticos en los que el receptor se debía encontrar separado del transmisor (ya que el receptor se veía afectado por el transmisor). Así pues, el duplexor permitió evitar esta interferencia entre transmisor y receptor, impulsando estos nuevos radares y desechando temporalmente el interés por el radar pasivo hasta la década de 1990.

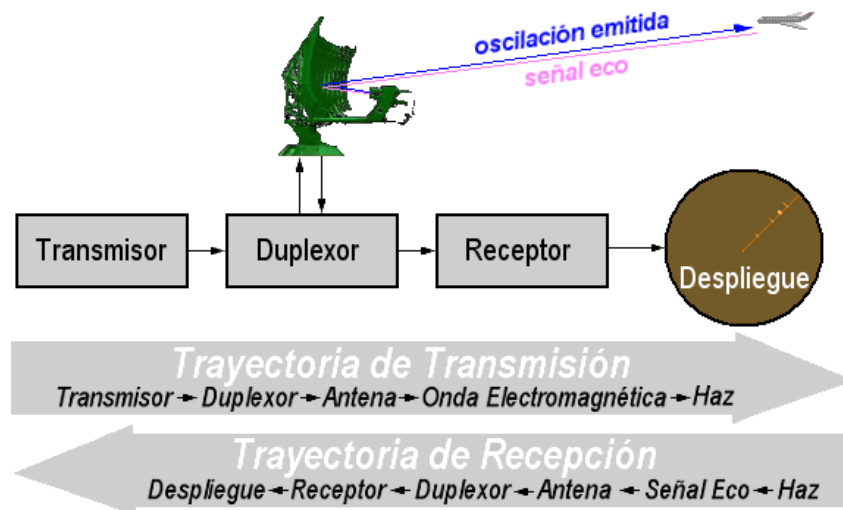


Figura 2-6 Funcionamiento del duplexor en radar pulsado [11]

#### 2.1.4 Reparación del interés en el radar pasivo hasta la actualidad

Es en esta década, cuando el Grupo de Investigación de Defensa de la Organización del Tratado del Atlántico Norte, realizó un estudio sobre el radar pasivo y sus capacidades. Esta reunión, desembocó en una reunión de especialistas en el campo, donde, entre otras cosas, se consideró por primera vez el establecer estaciones de radiodifusión como iluminadores de oportunidad a modo de transmisores [12]. Además, en este tiempo, el avance de la tecnología tenía como objetivo el aumento del sigilo de los blancos mediante una reducción de la RCS, sin embargo, la geometría biestática o multiestática de los radares pasivos y su uso con iluminadores en las bandas de UHF y VHF, eran capaces de imponerse sobre el sigilo de estos blancos.

En este momento, surgieron estudios para demostrar la viabilidad de esta tecnología PCL (*Passive Coherent Location*). Este es el ejemplo de la University College de Londres, donde Griffiths y Long, investigaron esta tecnología haciendo uso de estaciones de televisión analógica como iluminadores de oportunidad. Así, lograron obtener una gran distancia de alcance pues se realizó una detección de un avión a 260 km de distancia [13]. Entre otros ejemplos, se encuentran las investigaciones de Thales en Francia, obteniendo la patente de un método que explota el desplazamiento espectral de la portadora de TV, y los impulsos de sincronización de línea, otro ejemplo es la demostración de la detección pasiva de blancos por radar utilizando la iluminación de un radar de vigilancia VHF ruso, el cual se llevó a cabo bajo el nombre de Demostración de Radar Pasivo en 2001. Con esta tendencia surge el primer prototipo comercial que empleaba emisiones radio FM, desarrollado por la empresa Lockheed Martin, y recibió el nombre de "Silent Sentry" [14]

Finalmente, por lo tanto, fueron surgiendo otros sistemas semejantes como el caso de "Occiu". Desarrollado por una pequeña compañía telefónica, consistía físicamente en un array de 8 elementos y que resultó en ser uno de los principales predecesores del HA100 (siglas de Homeland Alerter con un alcance de hasta 100 km). El HA100 tuvo una buena repercusión y fue desarrollado por Thales, empresa la cual se encontraba ya perfilada en el sector del radar pasivo. Posteriormente, y más en la actualidad, otras industrias como Leonardo, HENSOLDT y ERA, así como instituciones de investigación como NC3A, la Universidad Tecnológica desde Varsovia y la Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeroespaciales (ONERA), se sumaron con sistemas experimentales o demostraciones [15].



Figura 2-7 Ficha técnica del desarrollo del “Silent Sentry” [14]



Figura 2-8 HA 100 Passive Radar [16]

En la actualidad, la gestión de grandes cantidades de datos con gran facilidad, así como la digitalización de las señales de radiofrecuencia, han facilitado enormemente la aplicabilidad de estos sistemas, tanto en el ámbito civil como en el militar.

## 2.2 Líneas I+D+I de interés para la Defensa

Para comprender las líneas de acción del Ministerio de la Defensa, es fundamental conocer la importancia de tener una visión completa y actualizada sobre las líneas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) que interesan a este Ministerio. En su Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa, se define una línea de I+D+i de interés, esta consiste en la aplicación de tecnologías a funcionalidades relacionadas con capacidades militares, con el objetivo final de mejorar dichas capacidades. La identificación de estas líneas debe combinar la visión tecnológica y su aplicabilidad.

Para ello, se utiliza la información proporcionada por los documentos aprobados en el proceso de planeamiento de la Defensa, entre los que destacan el Objetivo de capacidad militar y el Objetivo de Fuerza a Largo Plazo, así como otros documentos elaborados por el Estado Mayor de la Defensa y los Ejércitos y la Armada. De esta forma, se analiza la evolución previsible de las tecnologías, tanto consolidadas como emergentes, y su aplicabilidad a los procesos o sistemas que conforman una capacidad militar. Entre estas, destaca el desarrollo de la tecnología PCL de los radares pasivos, la cual se encuentra hoy en día como una de las principales tecnologías emergentes.

Un factor importante que debe considerarse al definir las líneas de I+D+i de interés, es la contribución al desarrollo de la base tecnológica e industrial nacional. Además de la capacidad militar y la tecnología, este es un objetivo importante de la política de I+D+i. Es necesario conocer la capacidad tecnológica nacional para evaluar lo que es realista y alcanzable dentro del marco temporal de la estrategia. Esta última, deberá coincidir con los seis años de desarrollo de la fase de ejecución del ciclo de planeamiento de la Defensa, es decir, los dos procesos deberán ir en consonancia el uno con el otro. Para determinar las líneas de I+D+i de interés para defensa, es necesario considerar estas tres variables: capacidad militar, tecnología y base tecnológica, e industrial nacional. Este proceso es continuo y se lleva a cabo a través del Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) del Ministerio de Defensa. El resultado de este proceso será fundamental para determinar los objetivos tecnológicos que se incluirán en la nueva estrategia [17].



Figura 2-9 Navantia, ejemplo de contribución a la industria nacional [18]

### 2.2.1 Líneas de acción

Recientemente la Universidad de Alcalá ha trabajado en un radar pasivo, el cual recibió el nombre de IDEPAR. Este desarrollo fue posible gracias a dos proyectos financiados por el Estado español; el propio proyecto IDEPAR, basado en la investigación sobre técnicas de detección mejoradas para radares pasivos, y el proyecto MASTERSAT con fundamento en el estudio de un receptor de radar pasivo multicanal, basado en iluminadores terrestres y satelitales. Este proyecto se nutrió en la investigación previa llamada APIS, liderada por INDRA SISTEMAS S.A., y financiada por el Ministerio de Defensa de España, en colaboración con la Agencia de Defensa Europea (EDA). El radar pasivo IDEPAR se ha utilizado para desarrollar y validar algoritmos en la generación de imágenes ISAR (Inverse Synthetic Radar), para clasificación de contactos en escenarios militares, en colaboración con el Ministerio de Defensa [19].





Figura 2-10 Promotores del proyecto IDEPAR [20] [21]

ISAR, consiste en una técnica de radar coherente que permite crear imágenes de objetos en movimiento que no resultan cooperativas. Estas imágenes generadas a partir de información de distancia y velocidad, pueden ser utilizadas en futuros procesos de reconocimiento o identificación. La técnica ISAR, tiene como objetivo complementar otros sistemas generadores de imágenes (como cámaras pasivas o sistemas láser radar) que pueden tener dificultades para operar en condiciones meteorológicas desfavorables [22].

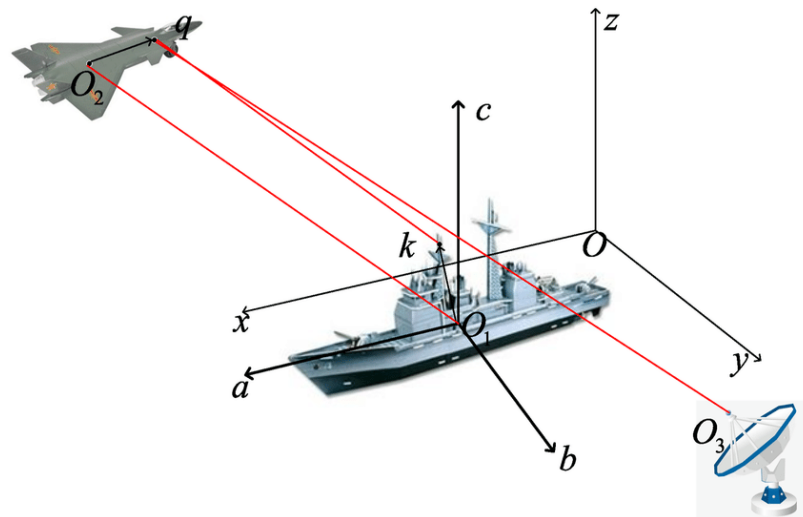


Figura 2-11 Modelo geométrico del empleo de técnicas ISAR [23]

El sistema, ha sido validado en la detección y generación de dichas imágenes ISAR, usadas en aviones comerciales durante su despegue y aterrizaje en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, utilizando la televisión digital terrestre (TDT). Así pues, el proyecto IDEPAR también obtuvo buenos resultados en la localización y seguimiento de blancos terrestres, en las pruebas realizadas en los terrenos exteriores de la Universidad de Alcalá [19].

Por otro lado, el Ministerio de Defensa, también presenta un gran interés en el desarrollo de sistemas de detección de drones, debido a la capacidad de estos drones para transportar materiales peligrosos, explosivos o cámaras de vigilancia. Estas capacidades ofensivas son factores a tener muy en cuenta en la conocida como defensa asimétrica de unidades. Esta defensa, puede ser el caso de un buque en un puerto hostil o el de la recopilación de inteligencia enemiga.



Figura 2-12 MQ-9 Reaper en lanzamiento de misil[24]

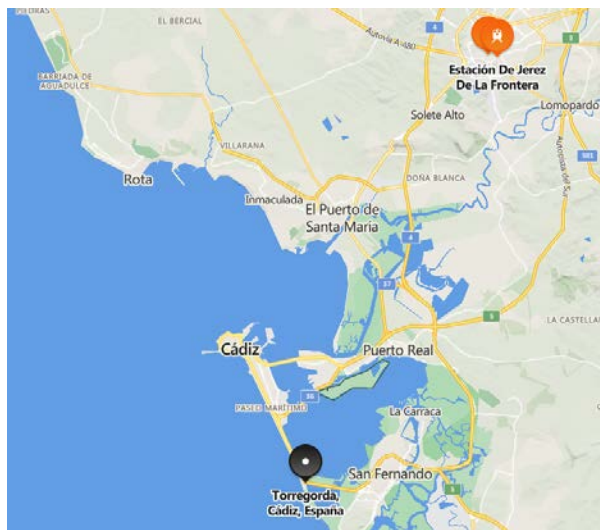
La capacidad del uso de IDEPAR para la detección de drones, se evaluó junto a la validación de los sistemas antidron en el proyecto CONDOR (promovido por la Dirección General de Armamento y Material del Ministerio de Defensa DGAM) [25]. Actualmente, el proyecto KRYPTON se encuentra actualizando el demostrador IDEPAR para la mejora el procesamiento de señales de banda ancha, la detección 3D y, la propuesta de una arquitectura de radar pasivo cognitivo. Estas mejoras se probaron en las campañas realizadas en la 11ª Escuadrilla de la Armada (en Torregorda, Cádiz) y en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en “La Marañosa”, Madrid.

- En las pruebas realizadas en “La Marañosa”, se puso a prueba la versión II del demostrador de radar pasivo de IDEPAR, cuya finalidad fue la detección de un dron modelo “Phantom IV” para ello, se utilizó el transmisor de Torrespaña como iluminador de oportunidad. Al finalizar las pruebas, la traza detectada del dron se ajustaba correctamente a su traza GPS, por lo que quedó validada su aceptabilidad a la hora de realizar detección y seguimiento de drones de pequeño tamaño sobre un ambiente terrestre [17].



**Figura 2-13 Campus La Marañosa y Torrespaña (iluminador de oportunidad) [26] [27]**

- Análogamente, en las pruebas realizadas en la 11ª escuadrilla de la flotilla de aeronaves, se puso a prueba la versión III de IDEPAR, para la detección y seguimiento del “Phantom III” mediante la estación de TV de Jerez de la Frontera como iluminador de oportunidad. De nuevo las conclusiones fueron satisfactorias, coincidiendo en gran medida con la traza GPS del dron, no obstante, los alcances máximos de detección fueron menores debido a condiciones externas al proyecto [17].



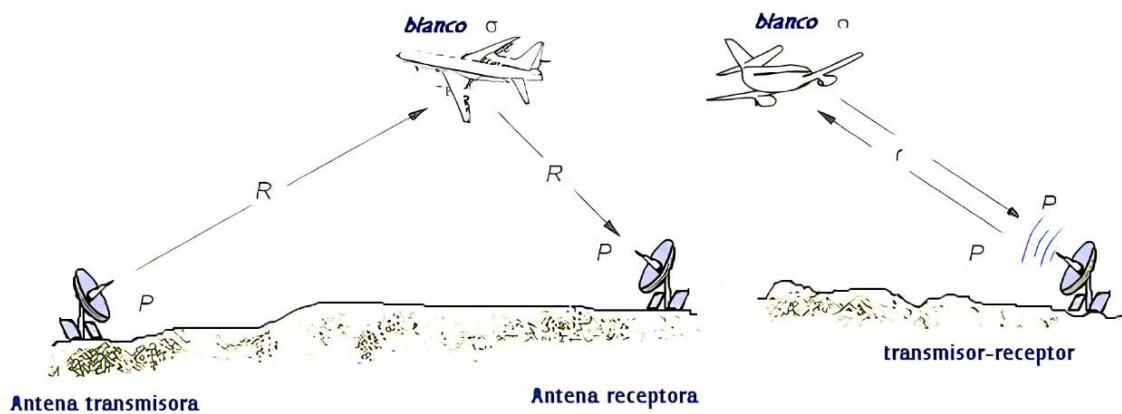
**Figura 2-14 Distancia Torregorda-TV Jerez (26km) [28]**



Figura 2-15 Dron modelo "Phantom" [29]

### 2.3 Principio de funcionamiento del radar pasivo

El funcionamiento del radar pasivo se basa en un sistema biestático, en el cual la posición del receptor es conocida mientras que la del transmisor puede serlo o no. Por lo tanto, el receptor deberá de ser capaz de medir, tanto la señal recibida de forma directa (perteneciente al iluminador de oportunidad), como la señal del iluminador reflejada sobre el contacto. Una vez logrado el recibir y discernir ambas señales, debe ser necesario un preprocesamiento y una correlación de estas. Con el objetivo de permitir detectar el blanco, pudiendo establecer una demora y distancia respecto de su emplazamiento y, finalmente, realizar un seguimiento y rastreo de este objetivo [30].



Esquema de un radar biestático (izquierda) y monoestático (derecha)

Figura 2-16 Esquema radar biestático (izq.) y monoestático (der.) [31]

De esta forma, el principio fundamental que sigue el radar pasivo para ser capaz de determinar el rango (o distancia) biestática, es la correlación entre ambas señales. Esta correlación se trata de una correlación cruzada, la cual se explicará más adelante, sin embargo, es importante conocer que, los datos de los que derivarán los parámetros para realizar dicha correlación, proceden del desfase en el tiempo de llegada de ambas señales [30].

### 2.3.1 Diferencia del tiempo de llegada de las señales (TDOA)

El TDOA (Time Difference Of Arrival), es medido por el receptor PCL al recibir la señal directa y el eco reflejado, esta diferencia temporal siempre existirá debido a que, la señal reflejada siempre habrá recorrido más distancia que la directa (manteniéndose constante la velocidad propagación de ambas señales electromagnéticas). Una vez el radar esté en posesión del TDOA, tiene la capacidad de realizar la correlación entre ambas señales, dando como lugar una matriz con los múltiples datos del rango-Doppler bidimensional. Con la matriz conformada, el sistema conoce la frecuencia Doppler biestática de cada contacto, es decir el rango biestático de cada contacto y su evolución en el tiempo.

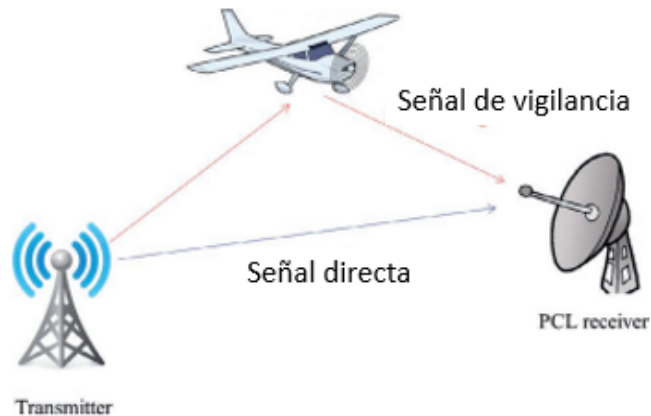


Figura 2-17 Esquema recepción de la señal directa y de vigilancia [30]

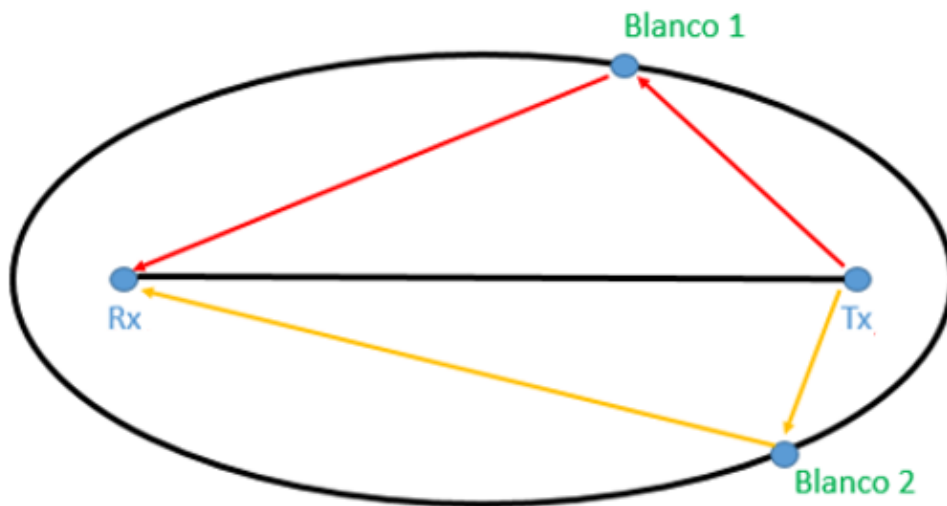


Figura 2-18 Esquema del sistema biestático de un radar pasivo [AP]

La distancia o rango biestático, permitirá establecer la existencia de una elipse cuyos focos, son el iluminador de oportunidad y el receptor y, sobre esta elipse, se encontrará el contacto. No obstante, no se puede determinar con exactitud cuál es el punto, de los infinitos que conforman la elipse, que contiene al blanco. Esto se debe a que todos ellos cumplen la premisa, en todos ellos la onda ha recorrido la misma distancia biestática hasta llegar al receptor (tal y como se muestra en la Figura 2-18 donde el blanco 1 y 2 presentan la misma distancia biestática). Conforme a esta limitación, existen distintos métodos para determinar con exactitud el punto que contiene al blanco. Entre estos cabe destacar:

- El uso de múltiples transmisores o iluminadores de oportunidad, de tal forma que cada uno genera una elipse distinta manteniendo el foco del receptor, pero variando el foco del transmisor, así estas elipses interseccionarán en el lugar geométrico de los puntos donde se halle el blanco.

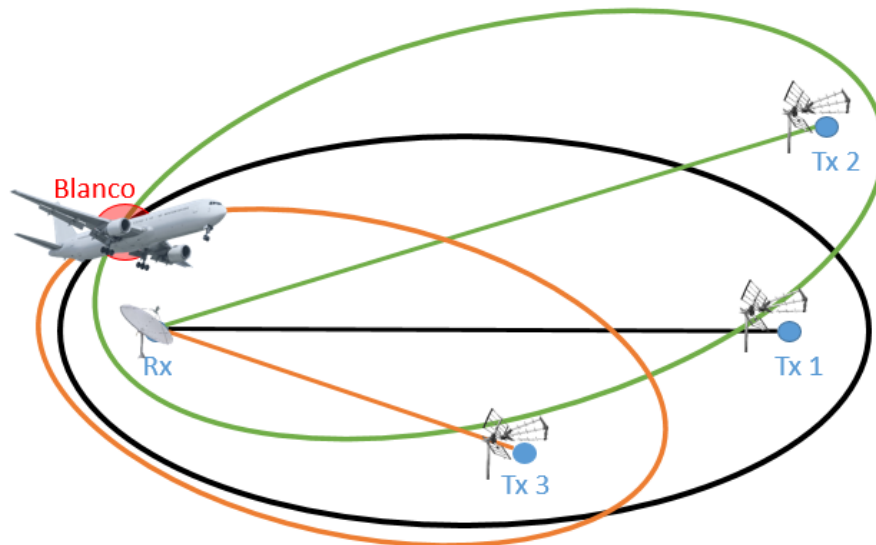


Figura 2-19 Determinación del blanco a través de tres elipses asociadas a tres iluminadores [AP]

- La determinación del ángulo de llegada de la señal (DOA), permite buscar el punto de corte entre esta demora y la elipse, ya sea trigonométricamente o buscando la intersección en el plano. En el desarrollo de este trabajo únicamente contaremos con un solo iluminador de oportunidad por lo que nos centraremos en este último método.



Figura 2-20 Determinación de blanco mediante elipse y DOA [AP]

Cabe destacar que la precisión con la que se determina la posición del blanco depende, principalmente, del ancho de banda empleado y del ancho de haz del receptor. Así, según las especificaciones de estos dos parámetros, se determina el uso de cada radar pasivo [30].

### 2.3.2 *Procesamiento de señales*

Como ha sido explicado anteriormente, se requiere de la recepción de las dos señales (la directa y su eco en el blanco), para poder hallar el rango Doppler, sin embargo, la contribución de la señal reflejada siempre será menor que la contribución de la señal directa. Esto genera que la señal directa enmascare y no permita discernir con claridad la información de la señal reflejada, la cual ha sido atenuada debido a su mayor recorrido realizado, y a su rebote sobre el objetivo a detectar. Este enmascaramiento no posibilita la detección de blancos de bajo Doppler, por ello se hace imprescindible un procesamiento de las señales que permita eliminar esta aportación de la directa. Por ese motivo, se requieren de dos canales para la recepción separada de ambas señales, en primer lugar, se requiere el conocido como “receptor de referencia” este, en la práctica, consiste en la antena generalmente apuntando en la dirección del iluminador de oportunidad. En segundo lugar, se encuentra el “receptor de vigilancia”, siendo este el encargado de recibir los ecos de los múltiples objetivos.

Mientras que el receptor de vigilancia tiene la posibilidad de ser multicanal (incluso llegando a mejorar sus prestaciones), el receptor de referencia suele ser un solo canal buscando conseguir la señal más limpia posible (suelen ser antenas altamente direccionales). La gran importancia en la obtención de esta señal de la mejor forma, se debe a que, uno de los pasos cruciales en el procesamiento de la señal, es eliminar la señal directa para evitar que sus lóbulos laterales interfieran con los ecos más débiles de los objetivos. Existen dos formas de lograr esta supresión: filtrando la señal recibida en el espacio, o en el dominio temporal. El primer método implica apuntar la antena del receptor de referencia hacia el transmisor para reducir la señal directa, mientras que el segundo método implica restar de manera coherente la contribución de la señal directa del canal de vigilancia. Cabe destacar que, si se utiliza una transmisión digital, se puede mejorar aún más el proceso de supresión de señales, ya que la señal directa es, a menudo, la más fuerte del canal de vigilancia. De esta forma, la señal se puede decodificar, dando como resultado un conjunto de bits, los cuales se pueden volver a codificar, obteniendo la señal original que ha sido transmitida. Esto se puede llevar a cabo únicamente con un solo canal del receptor de vigilancia, lo que permite huir de complejidades del sistema y costes evitables [30].

Conforme se obtiene la señal de referencia de forma limpia (tanto analógica como digital), el sistema procede a realizar la cancelación de interferencias. La finalidad de este proceso es la de suprimir la aportación de la señal de referencia sobre la señal rebotada, así como las trayectorias múltiples recibidas por el canal de vigilancia que puedan llegar a existir (ya sean señales derivadas de un mismo eco u otra clase de ruido). Tras esto, se produce un registro de rango-Doppler mediante Intervalo de Procesamiento Coherente (CPI), a través de la correlación cruzada entre la señal de vigilancia y de referencia "limpias". Este registro, se utiliza para la detección de objetivos y, posteriormente, se pueden procesar las detecciones de varios CPI para producir un seguimiento de los objetivos, permitiendo su monitorización. En la mayoría de procesos de detección, se lleva a cabo utilizando distintas técnicas como las que mantienen la tasa de falsa alarma constante. Los objetivos detectados pueden ser procesados para generar seguimientos. El seguimiento de objetivos puede realizarse en el dominio de rango-Doppler o en coordenadas cartesianas, y el uso de ambos métodos puede ayudar a reducir significativamente el número de falsas alarmas [30].

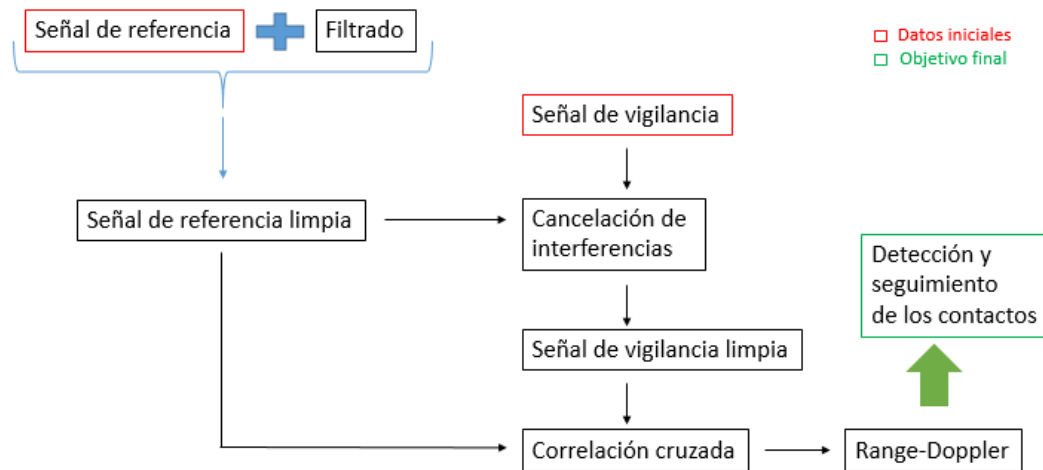


Figura 2-21 Esquema del procesamiento de las señales [AP]

## 2.4 Iluminadores de oportunidad

Los iluminadores de oportunidad (IO), se definen como aquellos transmisores de los que se hacen valer los receptores pasivos para poder detectar los blancos requeridos (sin que esta sea su función para la que fueron diseñados), usando el rebote de la señal transmitida.

De esa forma, los IO conforman el sistema biestático junto con el receptor estableciéndose como una parte fundamental del sistema. Por lo general, el tipo de IO utilizado en cada sistema, determinará el uso y finalidad específica de cada radar. Por lo tanto, surge la necesidad de asignar una clasificación a dichos IO [30].

### 2.4.1 Clasificación de los IO

En la actualidad no existe un único criterio para clasificar los distintos IO, sin embargo, el más aceptado es el que establece la diferencia entre IO terrestres y espaciales. Esta diferenciación, se realiza en función desde el punto donde se encuentran radiando, ya sea en la superficie terrestre o fuera de ella.

- Terrestres, en esta categoría destacan: los sistemas de transmisión de servicios públicos, los servicios de radio y televisión (ya sean analógicos o digitales), otros radares de vigilancia aérea o marítima y los sistemas de comunicación móvil.



Figura 2-22 Estaciones terrestres de transmisión [32]

- Espaciales, aquí destacan los iluminadores colocados sobre satélites como: algunos servicios de televisión, sistemas de comunicaciones móviles a gran escala, radares de índole meteorológica o de monitorización terrestre y los sistemas de geolocalización como puede ser el GPS o el sistema Galileo.

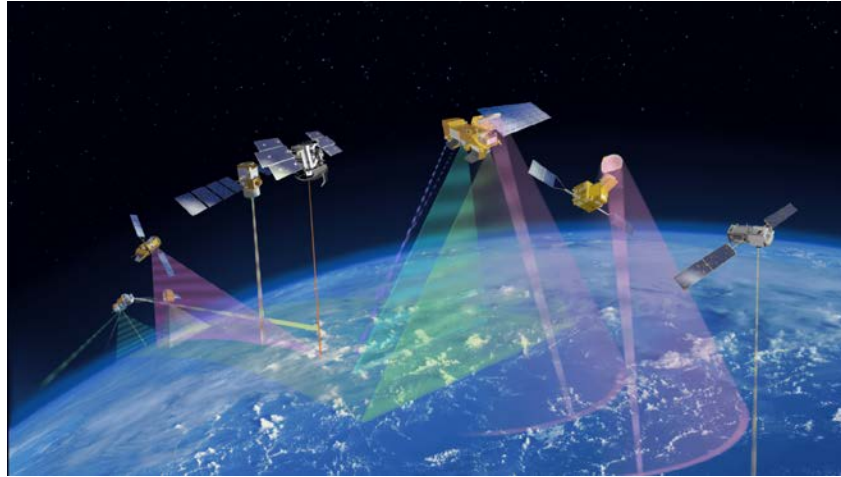


Figura 2-23 Satélites espaciales como iluminadores de oportunidad [33]

Cabe destacar que un IO idóneo para un radar pasivo PCL, debe suministrar una señal constante y confiable en el tiempo, con una potencia radiada isotrópica equivalente potente, idealmente abarcando una extensa área[30].

#### 2.4.2 Modulación de las transmisiones

Como se ha señalado previamente, es importante que la señal transmitida sea uniforme, es por ello que las transmisiones digitales son más convenientes que las analógicas. En los inicios, era muy común el uso de la radio FM en sistemas PCL debido a su disponibilidad y potencia de transmisión aceptable. No obstante, su modulación analógica hacía que el ancho de banda de la señal variase significativamente dependiente del contenido del programa transmitido. De forma miscelánea, la música rock resulta ser más adecuada para la comunicación de PCL, debido a su ancho de banda constante y grande, mientras que las noticias y otras contribuciones por voz, son menos efectivas [34]. Por este tipo de razones, la elección de un IO u otro, cobra especial importancia. Debido a esto, el uso de la radio FM comenzó a decaer rápidamente al surgir otros servicios de transmisión digital, como la radio y televisión digital terrestre. Estos servicios emplean una modulación OFDM (División Ortogonal de Frecuencia), permitiendo mantener constantes el ancho de banda y teniendo características predecibles de rango/Doppler/lóbulo. No obstante, la modulación digital también presenta desventajas, en su mayoría relacionadas con la presencia de patrones repetitivos en la estructura de la señal, lo que puede desembocar en posible falsas alarmas [35] [36].

Respecto a la radio y televisión digital, presentan un problema de cara a su uso como IO, ya que ambos trabajan en un SFN. Esto significa que todos los transmisores que pertenecen a la misma red, trabajan y transmiten a la misma frecuencia al mismo tiempo, lo que trae consigo la recepción de múltiples réplicas de la señal directa en el receptor. De esta forma se generan múltiples ecos, cada transmisor cercano genera uno de ellos. Como consecuencia, también puede ocurrir una asociación ambigua entre ecos y el transmisor que generó el eco, lo que dificulta en gran medida la geolocalización del objetivo. A pesar de las desventajas mencionadas, se han desarrollado, en gran medida, los sistemas basados en televisión digital terrestre.



Respecto a la tecnología SFN, busca obtener un uso más eficiente del espectro y el ancho de banda en la transmisión de señales terrestres. La tecnología SFN encuentra su motivación en que, en su contraparte (siendo esta la tecnología MFN), los transmisores emiten en diferentes frecuencias, así pues, en una red MFN, una zona de servicio puede requerir tres frecuencias diferentes ocupando 24 MHz, mientras que en una red SFN optimizada, solo se requieren 8 MHz. Para lograr esto, todos los transmisores en una red SFN deben transmitir la misma señal al mismo tiempo. De esta forma, se proporcionan unas ventajas de sincronización para sistemas PCL, que usan la tecnología SFN respecto a las MFN [37].

En cuanto a los satélites como iluminadores de oportunidad, los sistemas GNSS ofrecen una amplia cobertura, pero la EIRP (potencia radiada isotrópica equivalente), suele ser demasiado baja para los sistemas PCL y, además, las señales experimentan una gran atenuación debido a las largas distancias entre los transmisores y el receptor. Sin embargo, se han realizado con éxito experimentos utilizando sistemas GNSS en la actualidad [38] [39]. Los satélites DVB-SH son una excepción, siendo su intención proporcionar servicios de radiodifusión digital de alta calidad a dispositivos portátiles. En este caso, se esperan valores elevados de EIRP, lo que hace que estos transmisores sean atractivos para PCL junto con las características de la señal OFDM [40]. El éxito comercial de estos servicios, probablemente, impulsará su disponibilidad en el futuro cercano. Sin embargo, nuevos estándares emergentes como LTE (Long Term Evolution, asociado al 4G) podrían eclipsar a DVB-SH.

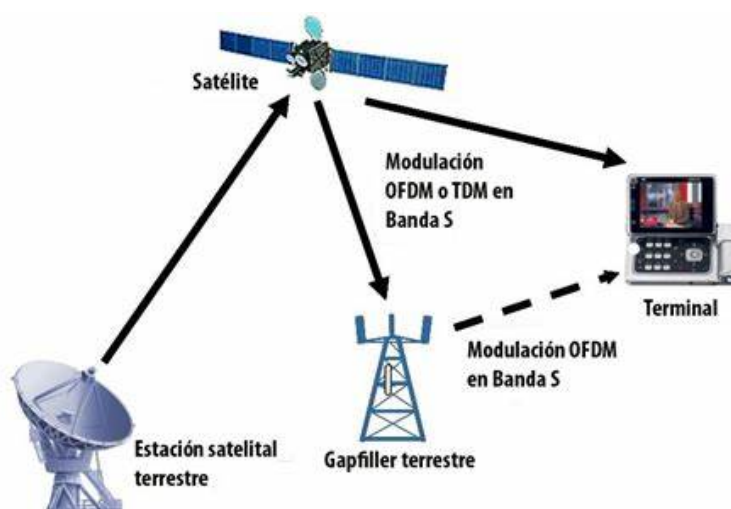


Figura 2-24 Esquema ejemplo del DVB-SH [41]

## 2.5 Procesamiento de las señales recibidas

Las señales recibidas por este tipo de radar, engloban la señal directa, las reflexiones de objetos en movimiento, las reflexiones de objetos estacionarios y el ruido. Para poder detectar y seguir un objetivo en movimiento, se deben llevar a cabo diversas etapas de procesamiento que permitan discriminar los retornos estacionarios no deseados de la señal del objetivo. Estas etapas incluyen: la correlación cruzada de la señal directa con las señales de eco, que se describe mediante la función de ambigüedad; los esquemas de detección que discriminan los ecos del objetivo del ruido; y secuencias de seguimiento de detecciones, primero en el dominio de rango-Doppler, y luego en el dominio cartesiano [30].

### 2.5.1 Correlación cruzada

El paso clave del procesamiento de PCL, es la correlación cruzada entre la señal directa y la señal del eco, también conocida como correlación de rango-Doppler. Su objetivo es detectar las contribuciones débiles del objetivo, retrasadas y desplazadas en frecuencia, en la señal recibida. La función de ambigüedad describe el rendimiento de la correlación cruzada, con diferentes retardos y desplazamientos Doppler y, depende fuertemente de la forma de onda de la señal. En el caso del radar biestático pasivo, la función de ambigüedad, también depende de la ubicación del objetivo en la geometría biestática, lo que no se tiene en cuenta en la correlación cruzada, pero es importante en etapas posteriores, como el seguimiento de rango-Doppler.

En la correlación cruzada, debido a la poca robustez que presentan las señales utilizadas en PCL frente al efecto Doppler, se realiza una correlación de la señal del eco con réplicas de la de referencia desplazadas en frecuencia Doppler. Esto permite la estimación precisa del valor Doppler biestático, junto con la medición inequívoca de la distancia del objetivo. Las características específicas de la función de ambigüedad dependen del tipo de señal utilizada, siendo las preferidas aquellas con un bajo nivel de lóbulo lateral. De esta manera, se reduce el riesgo de que los objetivos fuertes enmascaren a los objetivos débiles en el plano rango/Doppler [30].

$$X[\tau, f_D] = \sum_{n=0}^{N-1} S_{surv} * [n * T_s] * S_{ref}^* * [n * T_s - \tau] * e^{\frac{-j2\pi f_D n T_s}{N}} \quad (2.1)$$

La función de ambigüedad, la cual es el principal fundamento de la correlación cruzada, y su resolución, presentan una gran complejidad matemática. En este documento, se podría explicar más en detalle y se podría profundizar más en el tema, sin embargo, esta materia no se corresponde con el objetivo del trabajo. Para más información sobre dicha materia se pueden consultar las siguientes fuentes: [42] [43] [44].

### 2.5.2 Proceso de detección en PCL

El proceso de determinación de objetivos en PCL, es similar al de otros sistemas de radar, se basa en el proceso de decisión que determina si existe un objetivo dentro de una celda de rango/Doppler específica. Es importante considerar los problemas relacionadas con la estadística de las interferencias, la ocupación de una sola celda de rango/Doppler por un único objetivo, y la posible presencia de interferencias residuales no eliminadas.

En PCL, la principal fuente de interferencia es la señal directa, en lugar del ruido térmico del receptor. Por lo tanto, es crucial verificar que se cumpla la suposición de ruido gaussiano blanco aditivo antes de calcular el umbral de detección [45]. Este ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) se trata de un modelo básico de ruido, utilizado en la teoría de la información para simular procesos aleatorios que ocurren en la naturaleza. Es "aditivo" ya que en él se produce la suma de cualquier ruido intrínseco que pueda estar presente en el sistema. Es, también, "blanco" puesto que se refiere a la idea de que el ruido presenta una potencia uniforme en toda la banda de frecuencia del sistema. Finalmente, se denomina como "gaussiano" al tener una distribución normal en el dominio del tiempo con un valor promedio de cero. El ruido de banda ancha tiene muchas fuentes, como es el caso de las vibraciones térmicas de los átomos en los conductores, la radiación de cuerpo negro de la tierra y otros objetos cálidos, y fuentes celestes como el sol. Así pues, según el teorema del límite central de la teoría de la probabilidad, la suma de muchos procesos aleatorios tenderá a tener una distribución gaussiana o normal [46].

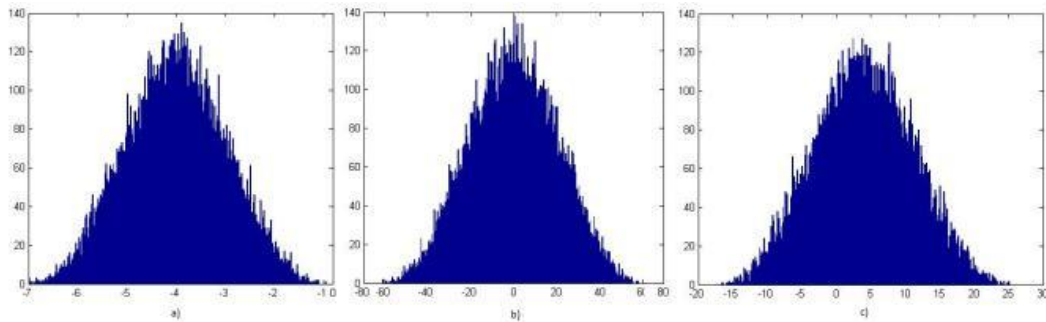


Figura 2-25 Ruido blanco aditivo siguiendo una distribución normal, Gaussiano [47]

En caso de que no se verifique la suposición de ruido gaussiano blanco aditivo, el modelo estadístico de interferencia debe ser consecuentemente modificado. Esto puede darse, por ejemplo, mediante el ajuste de otras funciones de densidad de probabilidad al registro de las interferencias y el cambio del umbral de detección correspondiente. Un modelo erróneo de las estadísticas de la interferencia, puede ocasionar en un aumento considerable de las alarmas falsas, por lo que cobra especial importancia.

La dimensión del objetivo en el mapa de rango/Doppler depende, fuertemente de las dimensiones físicas del objetivo y de la resolución de PCL en rango y Doppler. En aquellos sistemas de detección en los que se emplea IO como señales de radio en modulación FM, un objetivo aéreo generalmente ocupa una sola puerta de rango, no obstante, esto no suele ocurrir en aquellos sistemas que se aprovechan de las señales de televisión digital terrestre debido a su mejor resolución de rango. Por ello, en estos casos, puede ser útil utilizar algoritmos de agrupamiento, con ellos se agrupan múltiples celdas de rango/Doppler adyacentes en donde se han detectado objetivos, y se agrupan las detecciones como si fueran provenientes de un solo objetivo. El uso de técnicas de agrupamiento tiene un impacto significativo en la reducción del número total de detecciones, y las técnicas de agrupamiento comunes pueden tomarse para el procesamiento de imágenes [45].

El clutter, se encuentra comúnmente en los sistemas PCL en forma de señales directas y de vigilancia. Las técnicas utilizadas para suprimir el clutter, no siempre son efectivas de forma ideal, por ello, es complicado obtener una cancelación ideal de las interferencias, esto puede resultar en la presencia de clutter residual no eliminado. A parte de este inconveniente, también puede añadir una modelización incorrecta de las estadísticas del ruido y errores en el proceso de agrupamiento, lo que podría repercutir en que el número de falsas alarmas podría ser mucho mayor que el valor deseado. Este es uno de los principales problemas que deben ser abordados en el desarrollo de seguimiento de los sistemas PCL. Por lo general, el seguidor cuenta con dos etapas, la primera en el dominio de rango/Doppler para reducir las falsas alarmas y, la segunda en el dominio cartesiano para geolocalizar el objetivo y suavizar su trayectoria [30].

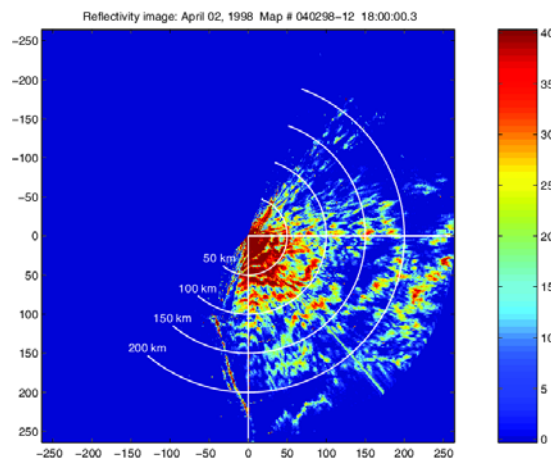


Figura 2-26 Representación del Clutter común [48]

### 2.5.3 Seguimiento distancia/Doppler

La etapa inicial de seguimiento, se realiza en el dominio distancia-Doppler con el objetivo de disminuir las alarmas falsas. Aquí, se gestiona el clutter y las detecciones no encontradas, lo que permite reducir el número de pruebas de los objetivos fantasma o falsos contactos, disminuyendo significativamente el problema para realizar el seguimiento en el dominio cartesiano.

El seguimiento en el dominio de la distancia/Doppler suele tener como fundamento un filtro Kalman lineal, de esta forma se aprovechan las mediciones realizadas por el algoritmo de agrupamiento [49] [50]. El filtro de Kalman, es una técnica para estimar el estado de un sistema utilizando mediciones. Este algoritmo funciona en dos etapas, en la primera, se hace una predicción del estado del sistema, mientras que, en la segunda se utilizan las mediciones para ajustar la estimación del estado del sistema, teniendo en cuenta el ruido presente en las mediciones [51].

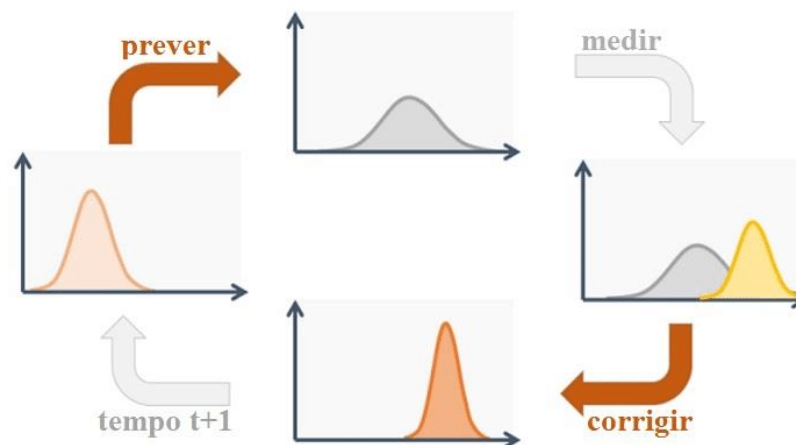


Figura 2-27 Ciclo del proceso del uso del filtro Kalman [52]

A continuación, se realiza la asociación de datos, comúnmente se puede utilizar el enfoque Global Nearest Neighbor, con la intención de encontrar y favorecer la asociación de datos más probable en cada escaneo [49]. Este enfoque consiste en una técnica de interpolación (mediante los polígonos de Voronoi), que busca la división del espacio en áreas equivalentes para cada uno de los puntos de las mediciones obtenidas. Así, el perímetro de los polígonos es equidistante a todos los puntos vecinos [53].

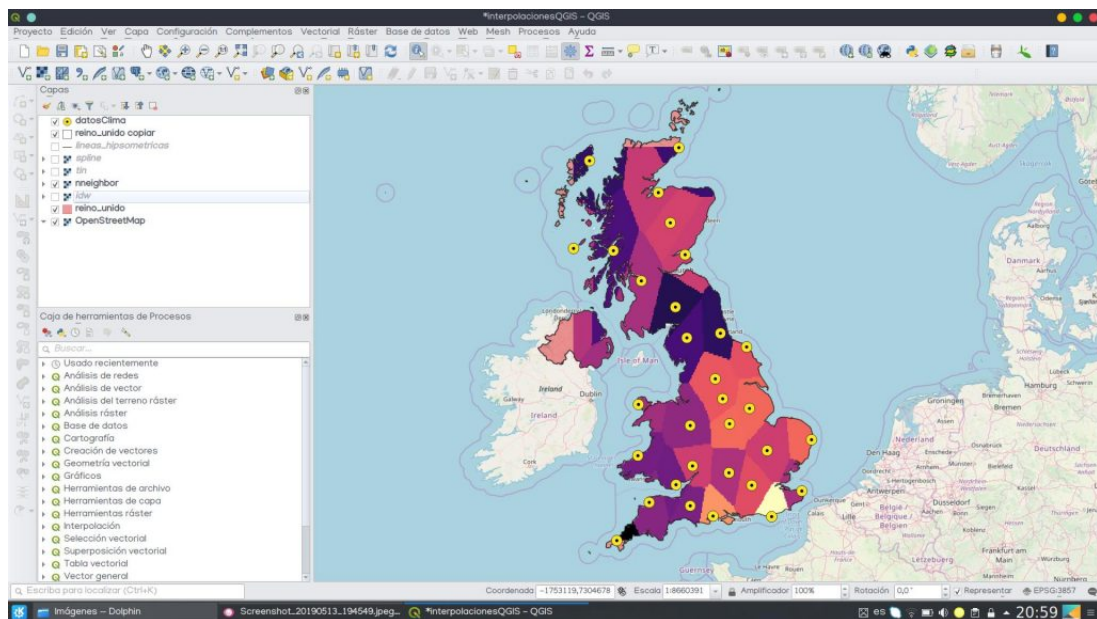


Figura 2-28 División del espacio en los Polígonos de Voronoi [53]

En el caso de que una detección no consiga una asociación a un blanco, surgen las conocidas como “pistas tentativas”. Estas pistas tentativas, a su vez implican una serie de escaneos sobre la detección no asociada, y en caso de producirse una asociación, la pista tentativa pasa a ser un “pista confirmada”. La eliminación de las pistas tanto, tentativas como confirmadas, se realiza de la siguiente forma: En primer lugar, si una pista tentativa no consigue asociarse a una detección tras los escaneos sucesivos, el sistema eliminará dicha pista; respectivamente, si una pista confirmada que sí logró asociarse no es refrescada con nuevas detecciones asociadas al mismo blanco durante un número de procesamientos o un límite de tiempo, la pista desaparecerá. Esto último se debe a que el seguimiento de los blancos se realiza mediante las detecciones sucesivas recibidas, permitiendo la estimación de la posición y velocidad [30].

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Fundamentos iniciales

Comenzando con el desarrollo del TFG, primero es necesario explicar ciertos fundamentos que hacen posible la toma de datos por parte del radar pasivo biestático.

Para ello será necesario exponer conceptos como:

- La geometría biestática y de los elementos de los que se compone.
- La resolución en distancia y diferencia entre los radares con emplazamientos monoestáticos y biestáticos.
- Obtención de la frecuencia Doppler biestática.
- La ecuación radar biestática.

#### 3.1.1 Geometría biestática

La geometría biestática hace referencia, fundamentalmente, a la geometría formada entre el transmisor (el cual pasará a llamarse tx en los distintos esquemas), el receptor (que recibirá el nombre de rx) y el blanco detectado por el receptor del sistema biestático. De esta forma, se establece el siguiente sistema biestático genérico, donde la posición del blanco podrá variar a lo largo de toda la elipse, y cada blanco tendrá asociada una distancia biestática. Por esta razón, de forma intrínseca, cada blanco tendrá asociada una elipse según la distancia biestática de detección que posea [30]:

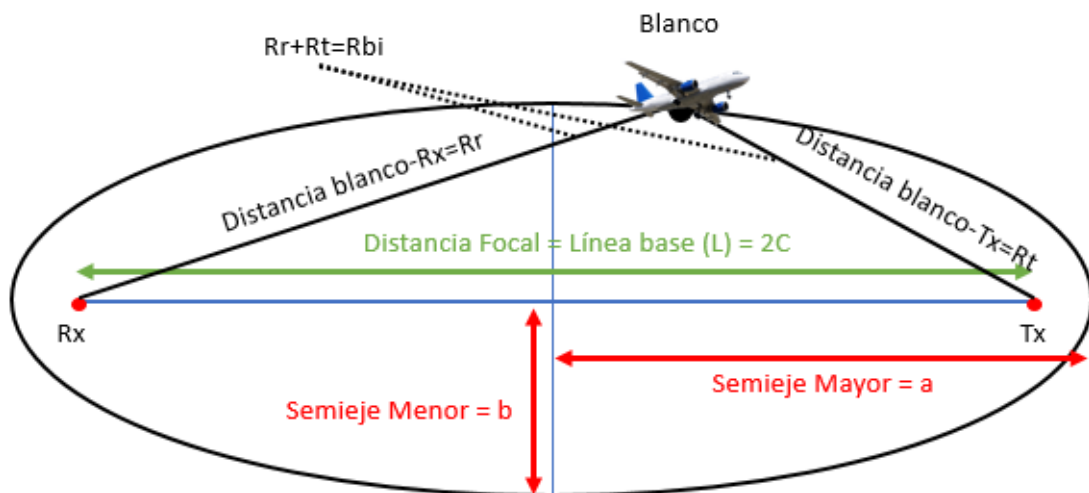


Figura 3-1 Esquema genérico en la detección de un blanco en un sistema biestático [AP]

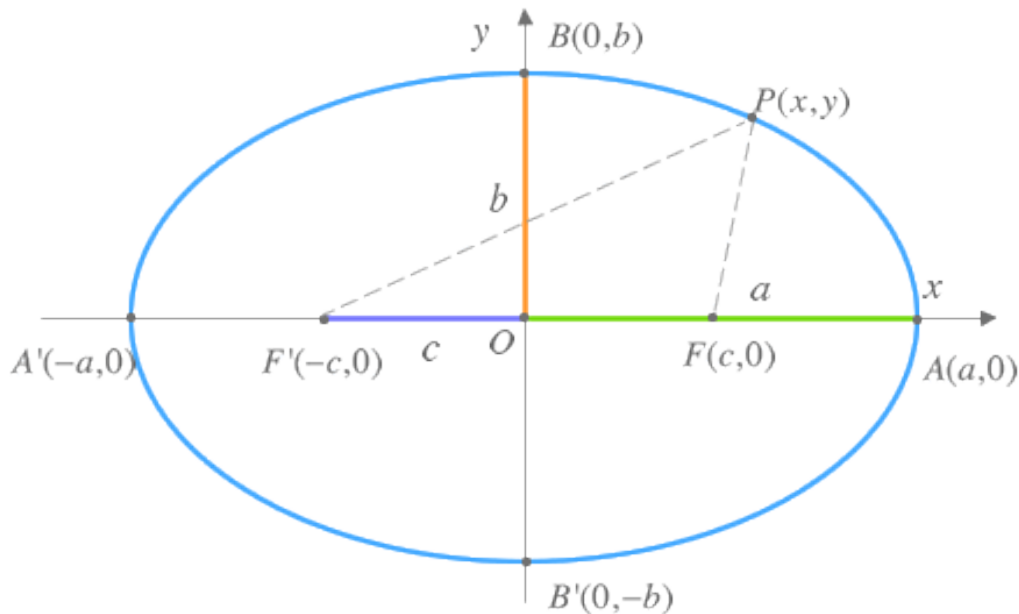
Tal y como se muestra en el esquema de la Figura 3-1, la cual consiste en la representación del plano biestático, la detección de un blanco comienza con el primer dato en ser recibido, la distancia biestática (gracias al TDOA como ya se explicó anteriormente). La distancia biestática, es la distancia total que ha recorrido la señal de vigilancia hasta llegar al receptor, es decir, consiste en aquella distancia transcurrida por la onda electromagnética desde que es transmitida por el transmisor (el IO), hasta su rebote en el blanco y su viaje hasta el receptor. De esta forma, se establece la distancia biestática  $R_{bist}$ , como:  $R_{bist}=R_t+R_r$ , donde  $R_t$  hace referencia a la distancia entre el transmisor tx y el blanco, y  $R_r$  a la homóloga con el receptor y el blanco [30].

Esta distancia biestática, en la realidad, no tiene la capacidad de ubicar al blanco con precisión en el espacio, no obstante, esta distancia, genera una elipse a lo largo de la cual se encuentra el blanco.

Se establece, por lo tanto, la primera premisa sobre la cual se trabajará para poder realizar la detección de blancos mediante el radar pasivo con IO: el blanco se encuentra sobre la elipse asociada a la distancia biestática. Esta elipse, tiene como focos el receptor pasivo y el transmisor a modo de IO, tal y como ya se explicó en el punto 2.3.1, de esta forma, una vez se conocen los focos, se debe definir la línea de base (L) como la línea encargada de unir sendos focos de la elipse. Cabe destacar que la línea de base es

$$L = 2c \tag{3.1}$$

puesto que  $c$  es la distancia desde el centro de la elipse al foco, siendo los focos siempre equidistantes al centro geométrico de la elipse [AP].



**Figura 3-2 Esquema genérico de una elipse [54]**

Tal y como se aprecia en la Figura 3-2, una elipse cualquiera se encuentra definida, principalmente, por la magnitud de sus semiejes mayores ( $a$ ) y menores ( $b$ ) [54]. El factor clave para poder realizar la extrapolación de los datos y ecuaciones que definen el comportamiento de una elipse, a un sistema biestático de detección de blancos, es el hecho de que la distancia biestática obtenida en recepción se define también como dos veces el semieje mayor de la elipse correspondiente [30]:

$$R_{bist} = R_r + R_t = 2a \tag{3.2}$$

Así, una vez conocida la distancia biestática, ya se conoce la magnitud del semieje mayor de la elipse. A partir de la magnitud de dicho semieje mayor y la distancia  $c$  (también conocida en caso de conocer el emplazamiento del receptor y el transmisor) del centro de la elipse a un foco, es posible obtener la magnitud del semieje menor de la elipse ( $b$ ), mediante la expresión [54]:

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} \tag{3.3}$$

Una vez conocidos  $a$ ,  $b$  y  $c$  de una elipse, ya se conocen todos los parámetros necesarios para poder definirla. Un detalle importante durante el desarrollo del trabajo, reside en que la elipse explicada en este apartado, en realidad, se trata de un elipsoide en caso de realizarse una representación tridimensional, por simplicidad en los cálculos y, asumiendo un error relativamente despreciable, durante el desarrollo del este trabajo, se ha asumido una representación bidimensional, entendiéndose las elevaciones del receptor y transmisor, iguales a 0.

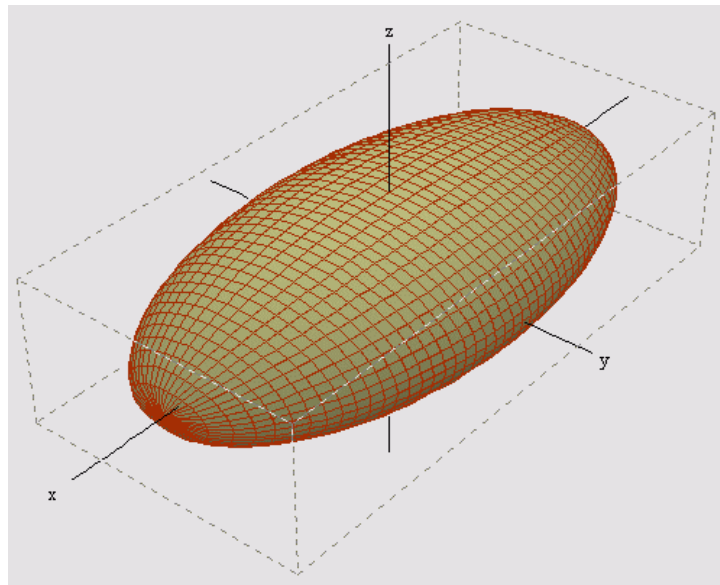


Figura 3-3 Representación de un elipsoide [55]

Un detalle dentro de la geometría biestática, consiste en que en todas las posiciones de la elipse donde se puede encontrar un determinado blanco, el ángulo entre la tangente de la elipse (en el punto donde se encuentre el blanco) y la mediatriz del ángulo biestático ( $\beta$ ), siempre será ortogonal, esto se puede apreciar en la Figura 3-4. Conviene destacar que el ángulo biestático, es aquel formado entre las rectas tx-blanco y blanco-receptor, con el blanco como vértice para la formación del ángulo [30].

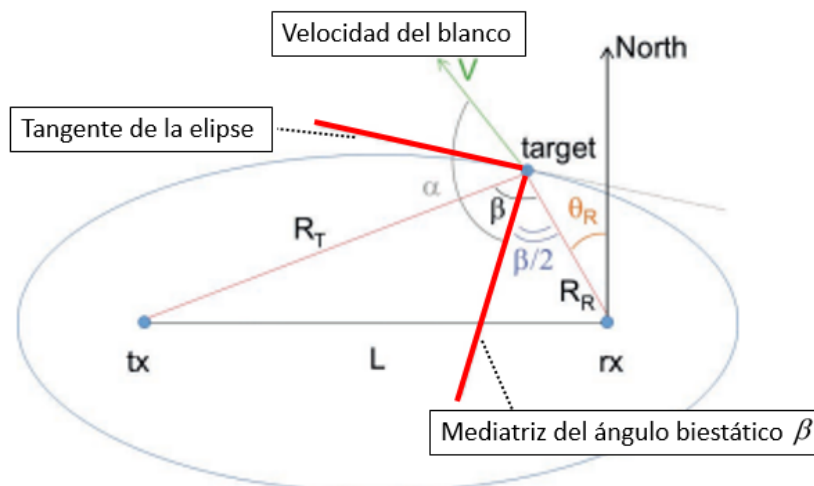


Figura 3-4 Ortogonalidad entre la tangente de la elipse y la mediatriz del ángulo biestático [30]

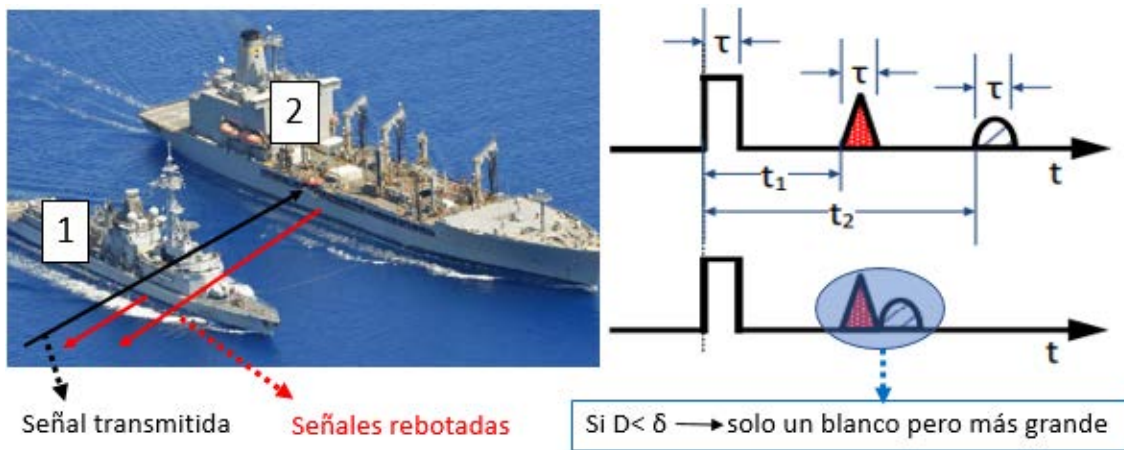


### 3.1.2 Resolución biestática en distancia

Consiste en la distancia mínima necesaria para que un radar pueda distinguir dos objetivos, en el caso monoestático se conoce como resolución de distancia o, simplemente, como la resolución del radar. La resolución es una medida espacial puesto que se trata de una distancia mínima, por este motivo, su unidad de medida es el metro. En el caso del radar monoestáticos de pulsos, la resolución corresponde con la fórmula:

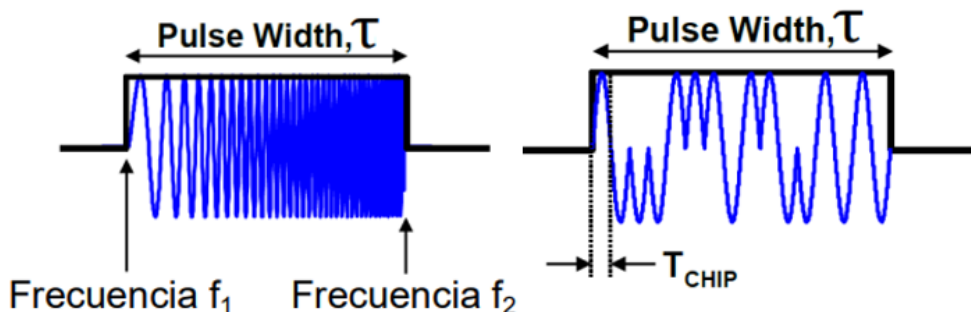
$$\delta_{Rmono} = \frac{c * \tau}{2} \tag{3.4}$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío, y  $\tau$  es la duración del pulso en el dominio del tiempo. Esta fórmula, tiene su fundamento en que el receptor no puede recibir señales durante la transmisión del pulso y  $c * \tau$  es la distancia que recorre la onda durante su transmisión. Así pues, la distancia mínima para discernir dos blancos, será la mitad de esta distancia debido al reflexión de la señal, ya que se crea una carrera de ida y otra de vuelta en el recorrido de las señales transmitidas y recibidas [56].



**Figura 3-5 Ejemplo de resolución en distancia de un radar pulsado [57] [56]**

Cabe destacar que, en caso de aplicar la técnica conocida como compresión de pulsos, la  $\tau$  en recepción disminuye a  $1/B$ , siendo  $B$  el ancho de banda de la señal transmitida. La compresión de pulsos busca independizar el alcance de la resolución, existen compresión de pulsos LFM o con técnicas digitales (como los códigos Barker en los que se subdivide el pulso en  $N$  subpulsos) [58].



**Figura 3-6 Compresión de pulso con LFM (izq.) y códigos Barker (der.) [58]**

Por lo tanto, en el caso monoestático,  $\delta_{Rmono}$  se define como la diferencia de dos círculos concéntricos con una diferencia radial de  $c/2B$ .

Una extensión de este concepto, ocurre en el caso biestático. Para hacer esto, se debe definir una resolución de rango pseudo-monoestática ( $\delta_{Rpseudo}$ ) como la diferencia en la separación entre dos elipses concéntricas con semiejes mayores  $a$  y  $a'$ , por lo tanto, dicha resolución mínima, será equivalente a la resta de dichos semiejes. La diferencia entre  $a$  y  $a'$  no puede ser menor que  $c/2B$ , es por ello que [59]:

$$\delta_{Rpseudo} = a - a' = \frac{c}{2B} \tag{3.5}$$

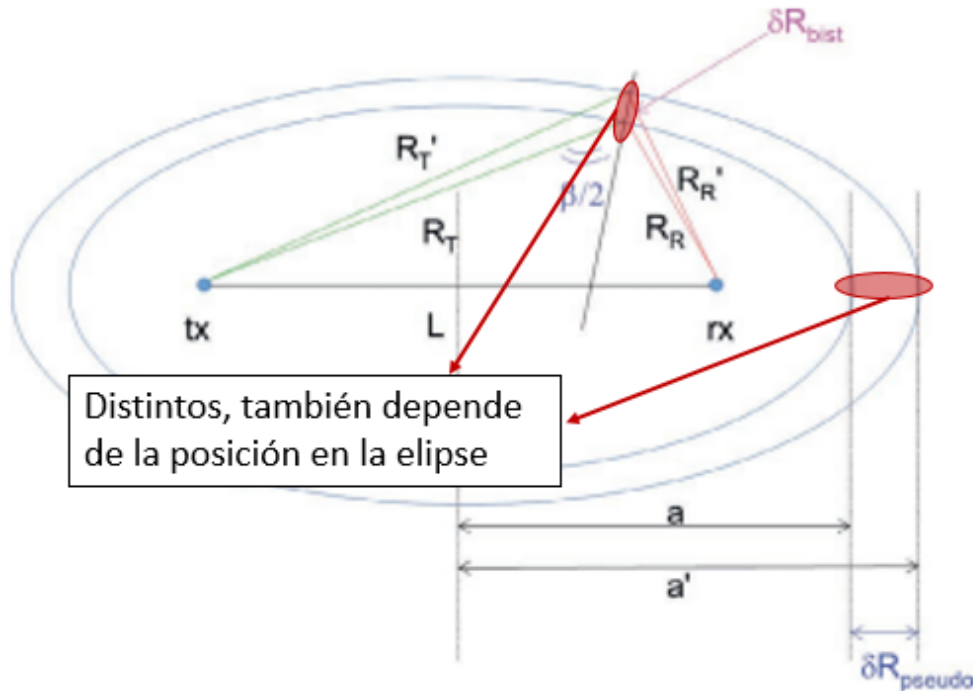


Figura 3-7 Diferencia entre  $\delta_{Rbist}$  y  $\delta_{Rpseudo}$  [30]

Según la Figura 3-7, está claro que la resolución de rango biestática  $\delta_{Rbist}$  no solo depende de  $\delta_{Rpseudo}$ , sino también de la posición específica dentro de la elipse. Al explicar esta última dependencia en función del ángulo biestático  $\beta$ , se puede aproximar la resolución de rango biestática como [59]:

$$\delta_{Rbist} \approx c / \left[ 2B \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] \tag{3.6}$$

### 3.1.3 Determinación de la frecuencia Doppler biestática

La frecuencia Doppler biestática, surge debido a dos factores, estos son la componente radial del movimiento relativo entre el transmisor y el objetivo, y la componente entre el receptor y el objetivo. Ambas contribuciones se hacen notables en la siguiente fórmula, a través de las derivadas parciales respecto del tiempo de  $R_t$  (transmisor-objetivo) y  $R_r$  (receptor-objetivo).

$$f_{bist} = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial t} R_{bist}(t) \right] = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial t} R_t(t) + \frac{\partial}{\partial t} R_R(t) \right] \tag{3.7}$$

Sin embargo, en este trabajo se trabajará con un transmisor estático y con un receptor que, al igual que el transmisor, tampoco poseerá movimiento alguno. Conforme a la ausencia de movimiento del receptor y transmisor, la existencia del Doppler biestático dependerá únicamente del movimiento real del blanco. Así pues, esta frecuencia Doppler quedará definida como:

$$f_{bist} = \frac{v}{\lambda} \left[ \cos \left( \alpha - \frac{\beta}{2} \right) + \cos \left( \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \right] = \frac{2v}{\lambda} * \cos(\alpha) * \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (3.8)$$

Los términos referentes a los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  de la Ec. (3.8), se reconocen visualmente en la Figura 3-4 como el ángulo biestático ( $\beta$ ) y el ángulo formados entre la componente de la velocidad del blanco y la mediatriz del ángulo biestático ( $\alpha$ ),  $v$  es la velocidad real del blanco en el momento en el que se está realizando la detección, y  $\lambda$  es la longitud de onda empleada en la transmisión.

Es importante resaltar que, existen diversos casos en los que la geometría biestática es incapaz de discernir un Doppler distinto de cero. Por lo tanto, en este tipo de casos, las detecciones por parte del sistema, serán imposibles de realizarse debido a que los rebotes de dichos blancos exhibirán un Doppler igual a 0, tal y como lo hacen los fuertes retornos del clutter. Los casos a destacar en los que pueden ocurrir la mencionada situación son:

- Cualquier objetivo que se mueva sobre la línea base, que une al transmisor y receptor, y en la misma dirección que esta. La frecuencia Doppler biestática obtenida es 0 debido a que la contribución del movimiento radial del blanco con el receptor y con el transmisor, se cancelan entre sí. Esto se puede ver con una mejor perspectiva enfocándose en la Figura 3-8 [30].

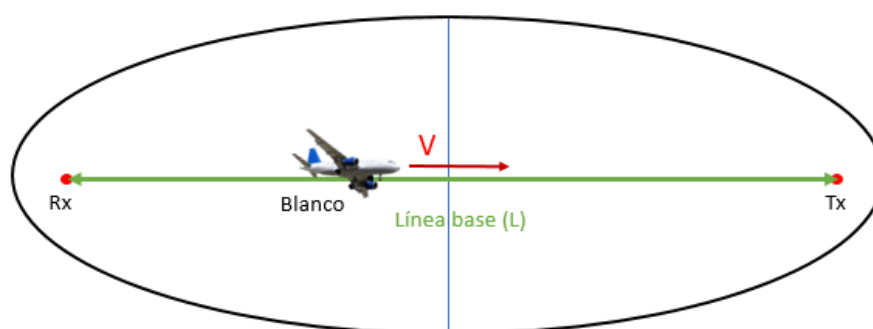


Figura 3-8 Ejemplo de Doppler 0 por cancelación de Doppler [AP]

- Todo blanco cuyo desplazamiento, se realice sobre su propia elipse asociada a la distancia biestática de ese blanco. En estos casos, la variación de la distancia biestática con el tiempo es nula, por lo que se hace imposible asignar una frecuencia Doppler biestática a esta clase de blancos [30].

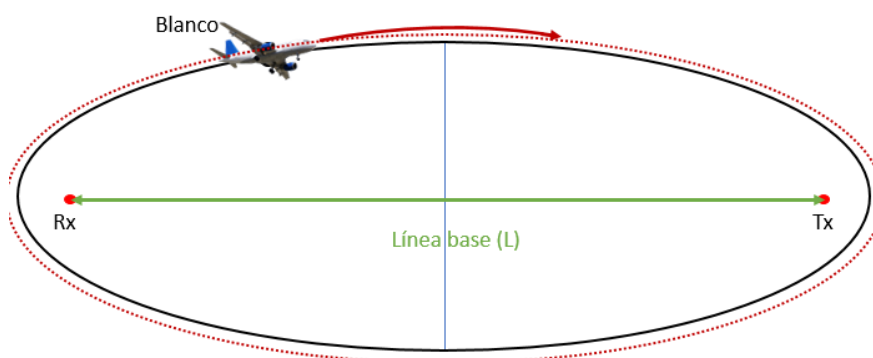


Figura 3-9 Ejemplo de Doppler 0 por nula variación de la distancia biestática [AP]

En este caso, utilizar una configuración multiestática permitiría obtener una diversidad geométrica que aumentaría la detección de todos los posibles movimientos. Es decir, si existen múltiples pares Tx-Rx posibles, se pueden definir de tal manera que los movimientos que no se detectan en una configuración biestática, sean detectables en otras. Por lo tanto, los objetivos siempre son detectables, independientemente de su movimiento, lo que mejora la conciencia situacional sobre el área observada [60].

### 3.1.7 Cobertura radar del sistema biestático

La ecuación de radar biestático, resulta fundamental para analizar el rendimiento de detección del sistema. En primer lugar, esta ecuación permite calcular la relación señal a ruido esperada (SNR), en función de la posición del objetivo, su sección radar eficaz (RCS), de las características del transmisor y receptor, la potencia transmitida y los patrones de radiación de las antenas.

En segundo lugar, la ecuación radar también permite estimar la cobertura máxima de detección del sistema radar una vez que se establecen las probabilidades de detección y falsa alarma deseadas, junto con los modelos de fluctuación del objetivo. Generalmente, el ruido térmico suele ser un factor bastante limitante a la hora de restringir el alcance radar, sin embargo, en las situaciones en las que los transmisores se encuentran próximos al receptor, los lóbulos laterales del transmisor cobran especial importancia como factor limitante.

Teniendo como objetivo la determinación de la cobertura máxima de detección, se establece una distancia monoestática equivalente ( $R_0$ ) a la ecuación radar biestática [30]. De tal forma que  $R_0$  es:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{P_{Ti} * G_{Ti} * \sigma * L^2 * G_{corr}}{4\pi * P_{TD} * G_{TD} * F_D * (SNR)}} \quad (3.9)$$

Hay que destacar que esta fórmula de la distancia monoestática equivalente, no se ajusta al caso en específico con el que trabajaremos en este trabajo. Esto se debe a que para llegar a esta fórmula es necesario tomar algunas premisas como verdaderas, algunas de las cuales no se adaptan al caso que, en específico, atañe este trabajo. Este puede ser el caso de la asunción del receptor como omnidireccional etc. Sin embargo, la fórmula es suficientemente genérica como para poder explicar qué factores modificables del receptor pueden ayudar a un aumento del  $R_0$ . Por otra parte, en caso de requerir más información acerca del origen, fundamento y significado de la Ec. (3.9) se puede consultar la siguiente fuente: [30].

Para obtener una mejora de  $R_0$ , se pueden tomar las siguientes medidas en relación al receptor, su ubicación y medida de procesamiento:

- Siendo  $L_d$  la línea base, cuanto más permita el sistema separar al receptor del transmisor, mejor alcance se obtendrá.
- Respecto a la capacidad de procesamiento, la  $G_{corr}$  es la ganancia obtenida al realizar el proceso de correlación entre la señal de vigilancia y la señal de referencia. El aumento de este parámetro supone un aumento proporcional de  $R_0$ .
- Finalmente, la ubicación del receptor influirá en las propiedades de propagación, así pues, cuanto menor sea  $F_d$ , es decir, el factor de propagación, mayor será el  $R_0$  puesto que son inversamente proporcionales.

## 3.2 Determinación de la posición de blancos

En el punto 2.3.1 se presentaron los distintos métodos para poder determinar la posición de los blancos. En el supuesto de disponer de varios iluminadores de oportunidad, existe la posibilidad de emplear el método de las intersecciones de varias elipses (cada una asociada a un iluminador de oportunidad distinto). Sin embargo, en el desarrollo de este trabajo únicamente se cuenta con un solo IO, por lo que el último método mencionado, no puede ser utilizado.

### 3.2.1 Datos iniciales

Para el desarrollo de este trabajo se dispone de un iluminador de oportunidad, el cual se trata de una torre de comunicaciones de televisión digital terrestre situado en Poio, Pontevedra, y de un receptor pasivo emplazado en la Escuela Naval Militar (constituido por un array de 4 elementos), en las cercanías de las instalaciones de los laboratorios del CUD.

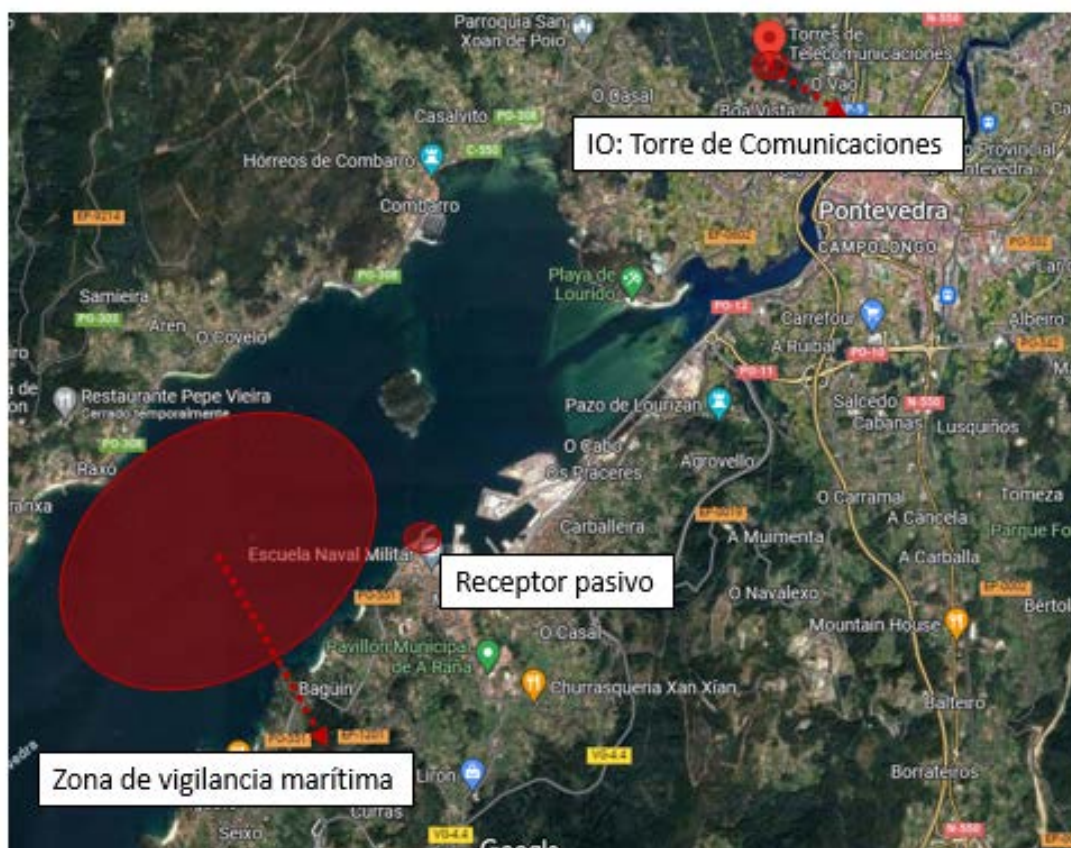


Figura 3-10 Situación geográfica del sistema bistático empleado [61]

Con estos medios, los datos iniciales de los que se dispone son: la distancia bistática de cada contacto, la orientación de la antena receptora (se supondrá constante durante cada experimento) y el DOA, es decir, el ángulo respecto a la antena del receptor sobre el que se encuentra el contacto. Es necesario añadir que, además de estos datos, también se cuenta con su evolución en el dominio temporal representando el movimiento de los objetivos.

| Rango bistático (m) | DOA(°) |
|---------------------|--------|
| 3687,5              | 10     |
| 3700                | 10     |
| 3712,5              | 10     |
| 3725                | 10     |
| 3737,5              | 10     |
| 3750                | 10     |

Tabla 3-1 Ejemplo datos de partida de un mismo contacto

La tabla 3-1 representa los datos de partida, entorno a los cuales se realizarán los cálculos y procesamientos necesarios para poder determinar la posición del blanco (en coordenadas cartesianas). De esta forma, en esta tabla, se tratan de datos referentes a un mismo blanco y en un mismo intervalo de integración temporal (CPI).

Aquí, se puede observar que todas las distancias biestáticas corresponden al mismo blanco, ya que se tratan de varias detecciones realizadas por el radar pasivo, sobre el mismo blanco. Obviamente, de forma teórica, debería existir una sola detección por cada blanco.

Sin embargo, las señales transmitidas por los IO empleados, no se encuentran optimizadas para realizar detecciones por medio de estos sistemas, sino que están diseñados para cumplir las funcionalidades para las que fueron concebidos inicialmente, esto origina que, debido a las características de la transmisión, se produzca este fenómeno de múltiples detecciones. De esta forma, se genera una nube de puntos donde debería existir un contacto. Durante el desarrollo de este trabajo, las detecciones son obtenidas por medio de simulaciones que tienen en cuenta este fenómeno.

El comportamiento de los cálculos ante este fenómeno, seguirá un criterio indiferente ante el caso en el que la detección pertenezca a un mismo contacto o a otro distinto. Esto se debe a que estas detecciones se encuentran muy próximas entre sí, y en el momento de representarlas no ensucian de forma notable el mapa sobre el cual se plasmarán dichas detecciones, no obstante, sí que se debe tener en cuenta para el posterior análisis de los resultados.

De la misma forma que en la Tabla 3-1, existen tablas homólogas para cada intervalo de tiempo (distintos CPIs) durante la detección del contacto. Con estos datos, se consigue una representación en coordenadas cartesianas que permite una visualización de la evolución del contacto en espacio y tiempo.

| 1x5 struct with 1 field |             | targetOutLocation(1).beam |            |   |     |   |
|-------------------------|-------------|---------------------------|------------|---|-----|---|
| Fields                  | beam        | 1                         | 2          | 3 | 4   | 5 |
| 1                       | 17x3 double | 1                         | 3275       | 0 | -33 |   |
| 2                       | 17x3 double | 2                         | 3.2875e+03 | 0 | -33 |   |
| 3                       | 17x3 double | 3                         | 3300       | 0 | -33 |   |
| 4                       | 17x3 double | 4                         | 3.3125e+03 | 0 | -33 |   |
| 5                       | 18x3 double | 5                         | 3325       | 0 | -33 |   |
| 6                       |             | 6                         | 3.3375e+03 | 0 | -33 |   |
| 7                       |             | 7                         | 3.3875e+03 | 0 | 12  |   |
| 8                       |             | 8                         | 3400       | 0 | 12  |   |
| 9                       |             | 9                         | 3.4125e+03 | 0 | 12  |   |
| 10                      |             | 10                        | 3425       | 0 | 12  |   |
| 11                      |             | 11                        | 3.4375e+03 | 0 | 12  |   |
| 12                      |             | 12                        | 3650       | 0 | -32 |   |
| 13                      |             | 13                        | 3.6625e+03 | 0 | -32 |   |
| 14                      |             | 14                        | 3675       | 0 | -32 |   |
| 15                      |             | 15                        | 3.6875e+03 | 0 | -32 |   |
| 16                      |             | 16                        | 3700       | 0 | -32 |   |

Figura 3-11 Tablas de varios CPIs (izq.) y de un mismo intervalo con varios blancos (der.) [AP]

Los datos de la Tabla 3-1, han sido extraídos de un archivo similar al de la parte derecha de la Figura 3-11. Por lo tanto, los archivos “TargetOutLocation”, contienen todos los datos de las detecciones de los múltiples contactos detectados para cada instante de tiempo que dura la detección. Estos datos, se encuentran contenidos en subarchivos llamados “TargetOutLocation.beam” los cuales, solo contienen los datos para un instante de tiempo determinado.

### 3.2.2 Método empleado

El método empleado para la determinar la posición de los blancos, consiste en buscar la intersección entre la elipse asociada a cada blanco por su distancia biestática, y la recta determinada por el ángulo de llegada de la señal DOA. Antes de poder realizar la intersección, es necesario comprender en primer lugar, que representa cada ángulo y respecto de dónde están tomados. Esto se debe a que, para conseguir la ecuación de la recta, será necesario conocer su pendiente, y por ello, el ángulo que la determina.

### 3.2.2.1 DOA respecto a la línea base

Para la siguiente explicación, se asumirá el ángulo de orientación de la antenna igual al de la línea base (Tx-Rx). El DOA se tratará como una línea infinita de la que se conoce su punto de partida inicial (el receptor), y su pendiente (a partir del ángulo formado con la orientación de la antenna, en este caso el mismo que el de la inclinación de la línea base).

Resulta importante destacar que, el ángulo empleado para calcular la pendiente de la recta, no es el que forma con la horizontal (la cual correspondería con el paralelo terrestre que pasa por la latitud del receptor), sino el formado con la línea base que une al transmisor y receptor. Ambos ángulos podrán coincidir o no, en función de si la línea base se encuentra sobre el paralelo anteriormente mencionado, o de si presenta alguna inclinación.

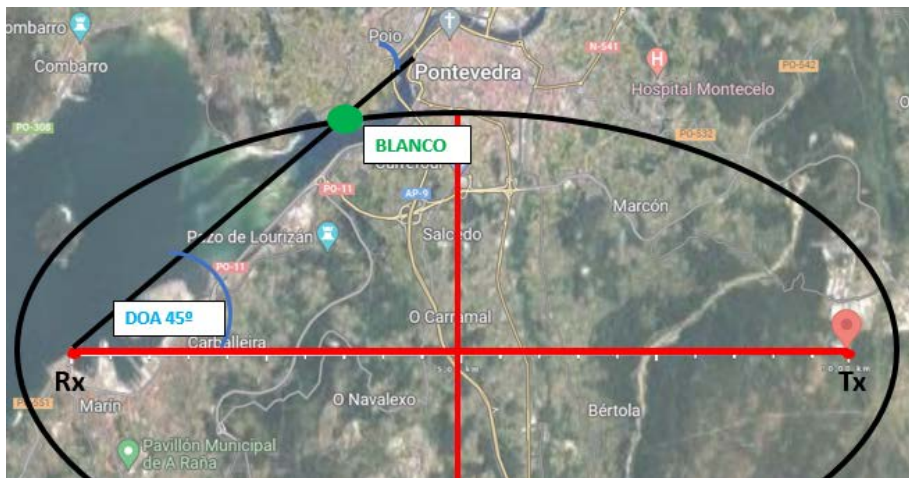


Figura 3-12 Ejemplo de línea base sin inclinación [AP]

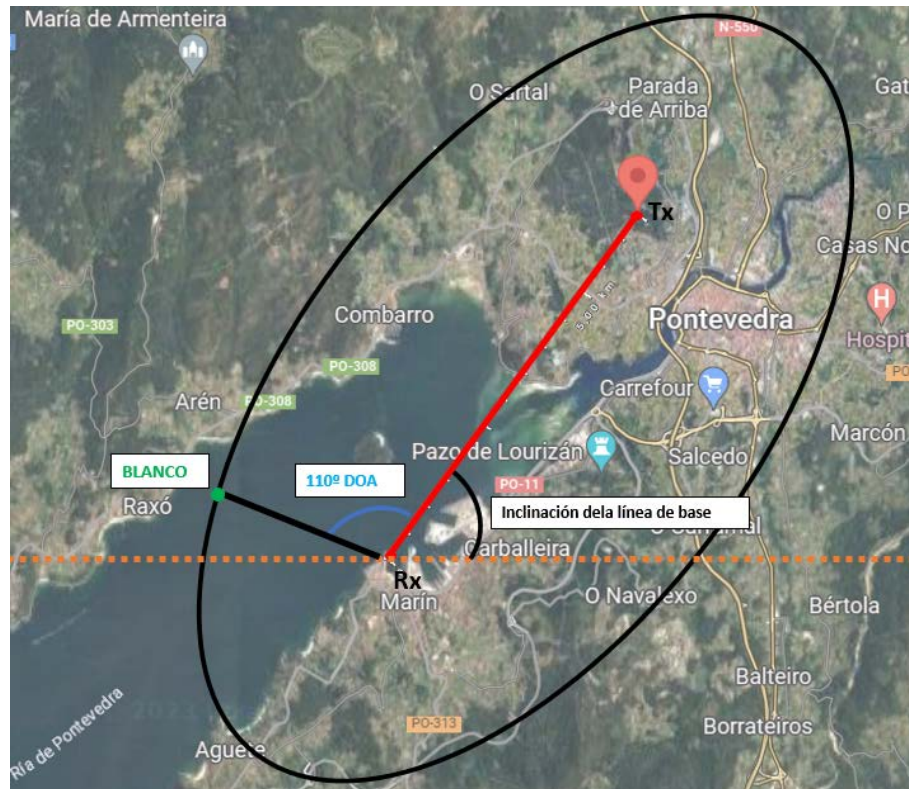


Figura 3-13 Ejemplo de línea base con inclinación sobre la horizontal [AP]

### 3.2.2.2 Ángulo entre la recta Rx-blanco y la línea base

En apartado anterior, se trató al DOA como el ángulo entre el blanco y la línea de base, sin embargo, esto solo es cierto cuando la antena del receptor se encuentra orientada en la misma dirección que la línea base. En la mayoría de las situaciones, y en muchos de los casos que serán tratados en el desarrollo de este trabajo, la antena del receptor presenta una orientación con el objetivo de maximizar y mejorar las detecciones en el área de vigilancia. Es importante resaltar que la orientación de la antena se mide desde la horizontal del receptor, es decir, desde el paralelo terrestre que lo contiene.

Debido a la orientación de la antena, se debe hacer énfasis en el concepto del DOA, el cual se define como el ángulo respecto a la orientación de la antena del receptor sobre el que se encuentra el contacto. De esta forma, también se puede establecer el DOA como, la diferencia angular entre el ángulo real de la línea Rx-contacto con la línea base (recibirá el nombre de  $\theta$ ) y el ángulo de la orientación de la antena, más la inclinación de la línea base. El ángulo utilizado para el cálculo de la pendiente de la recta sobre la que se encuentra el contacto será  $\theta$ , el cual se hallará como:

$$\theta = DOA + \text{orientación de la antena} - \text{Inclinación de la línea base} \quad (3.10)$$

Por lo tanto, lo que en las Figuras 3-12 y 3-13 era el DOA, realmente es  $\theta$  (en esos casos su valor coincidía). Si en el caso de la Figura 3-13, la antena estuviese orientada  $90^\circ$  quedaría de la siguiente forma:



Figura 3-14 Cálculo de  $\theta$  con inclinación de la línea base [AP]

En el caso de la Figura 3-13, si la antena tuviese una orientación de  $30^\circ$  se tendría:



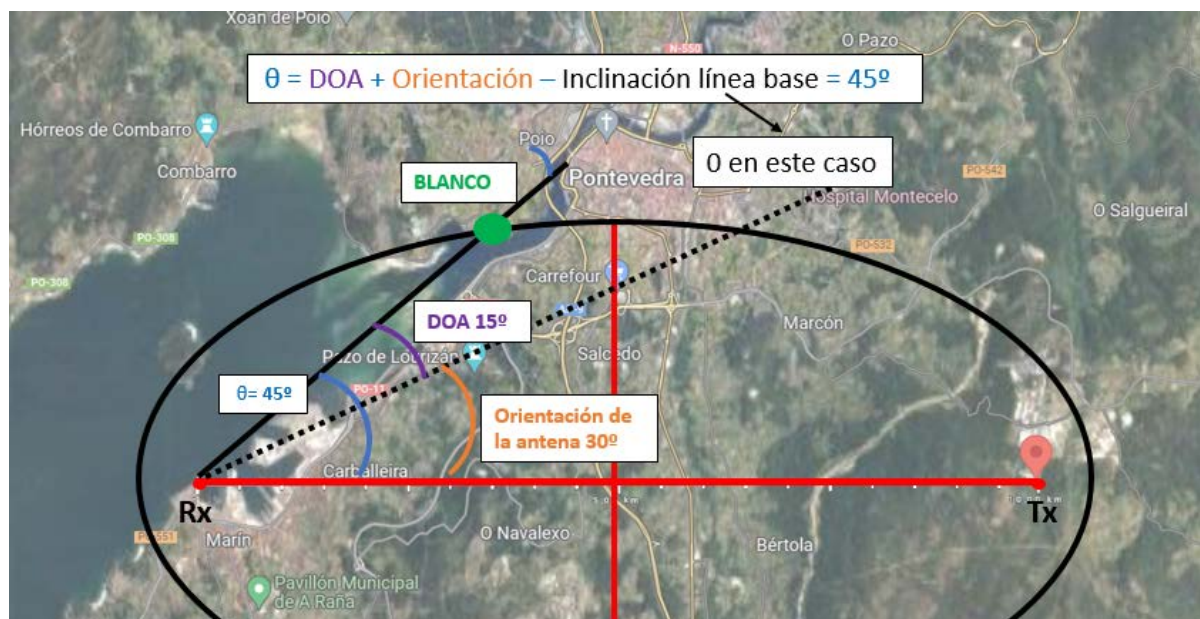


Figura 3-15 Cálculo de  $\theta$  sin inclinación de la línea base [AP]

### 3.2.2.3 Ecuaciones de la elipse, la recta e intersección

Una vez se tiene el conocimiento del ángulo  $\theta$ , el cual determina la pendiente de la recta que contiene al contacto, ya se tienen todos los datos necesarios para establecer matemáticamente la ecuación de la recta. Así pues, se define la ecuación explícita de la recta como el lugar geométrico de los puntos que cumplen:

$$y = mx + y_0 \quad (3.11)$$

Siendo  $m$  la pendiente de la recta e  $y_0 = 0$ , ya que la recta tiene su inicio en el centro de coordenadas. La pendiente ( $m$ ) queda definida como:

$$m = \tan(\theta) \quad (3.12)$$

Por otro lado, para establecer la ecuación de la elipse se debe tener en cuenta que el centro de coordenadas, se encuentra, en este caso, en unos de sus focos, concretamente en el receptor (desde donde sale la recta). Así, se define la elipse como:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (3.13)$$

Donde  $(x_0, y_0)$  hacen referencia a las coordenadas del centro de la elipse. Como ya se vio en el esquema genérico de la elipse en la Figura 3-2, los focos distan del centro de la elipse una distancia “ $c$ ” y se encuentran a la misma altura “ $y$ ” por lo que las coordenadas del centro de la elipse serán  $(c,0)$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.14)$$

Con estas ecuaciones, se obtiene un sistema de ecuaciones, con dos ecuaciones y dos incógnitas, para realizar la intersección matemática. Resolviendo por el método de sustitución, se sustituye la coordenada “ $y$ ” de la recta, en la correspondiente de la ecuación de la elipse. Obteniendo:

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{(m*x)^2}{b^2} = 1 \quad (3.15)$$

Gracias a las propiedades de la elipse, el valor de “c” es conocido, puesto que la línea base tiene una longitud “2c” y, al conocer el emplazamiento de los dos focos, también se conoce la distancia entre ellos.

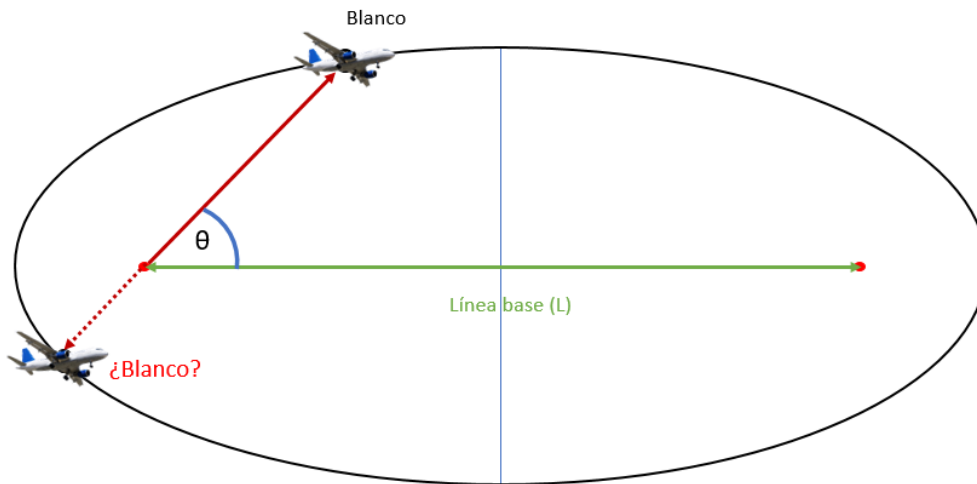
Finalmente, “b” es conocido ya que los fundamentos de la elipse establecen:

$$b = \sqrt{a^2 + c^2} \tag{3.16}$$

Conociendo “b, c, m” y sabiendo que “a” es el semieje menor de la elipse y es quien la define, conociendo su valor a partir de la distancia biestática medida por el receptor, la Ec. (3.15) presenta todos los términos conocidos menos la “x”. Despejando la incógnita “x” se obtendrá el punto en el eje X (el eje X es la línea base) en el que se produce la intersección buscada. Por lo tanto, despejando la Ec. (3.15):

$$x^2(b^2 + a^2m^2) + x((-2)b^2 * c) + (c^2 * b^2 - a^2b^2) = 0 \tag{3.17}$$

La Ec. (3.17), se trata de una ecuación de segundo grado, la cual tendrá dos posibles soluciones. Gráficamente estas dos soluciones hacen referencia a que la recta tiene su origen en el foco del receptor, sin embargo, la recta “crece” desde ahí, en la misma dirección, y en sentidos opuestos. Por lo tanto, la recta se desarrolla en dos sentidos y no solo en uno, por lo que efectúa dos cortes o intersecciones sobre la elipse.



**Figura 3-16 Representación gráfica de las dos posibles soluciones de Ec. (3.17) [AP]**

Tal y como se aprecia Figura 3-16, siempre existirán dos posibles soluciones a la Ec. (3.17) no obstante, eso no lleva implícito el que existan dos blancos. Lo más probable es que solo haya un blanco, pero dos posibles soluciones, por ello nace la necesidad de determinar cuál de las dos soluciones contiene al blanco.

Para ello, es fundamental apreciar que todas aquellas soluciones que se encuentran a la izquierda del foco del receptor, presentarán un valor menor (en el eje X de la elipse) que aquellas soluciones que se hallan a la derecha del foco. Teniendo en cuenta que las soluciones más grandes de Ec. (3.17), vendrán de la mano de la raíz positiva, y que las soluciones más pequeñas en magnitud, lo harán de la mano de la raíz negativa de la solución de la ecuación de segundo grado; se puede afirmar que, aquellas soluciones a la derecha del foco estarán asociadas con la raíz positiva y la que se encuentran a la izquierda lo harán con la raíz negativa.

Por lo tanto, sabiendo si el blanco se encuentra a derechas o izquierdas del foco, se puede determinar la solución requerida. Para conocer si el blanco se encuentra a derechas o a izquierdas del foco se debe observar  $\theta$ , ya que este ángulo posee dicha la información. De esta forma, si la proyección del ángulo  $\theta$  sobre el eje X de la elipse es positivo, el blanco se encontrará a la derecha del foco, y si la proyección es negativa, estará a la izquierda. La proyección de  $\theta$  sobre el eje X es su coseno, es por esto que, el signo del coseno determinará la solución a escoger.

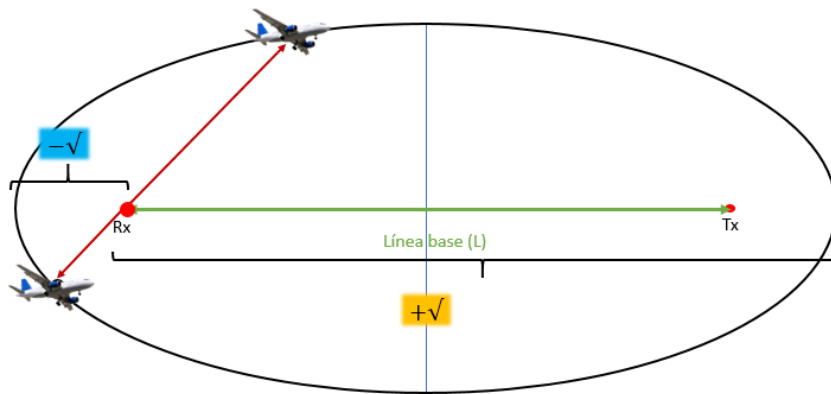


Figura 3-17 Representación de la solución de Ec. (3.17) según su posición en la elipse [AP]

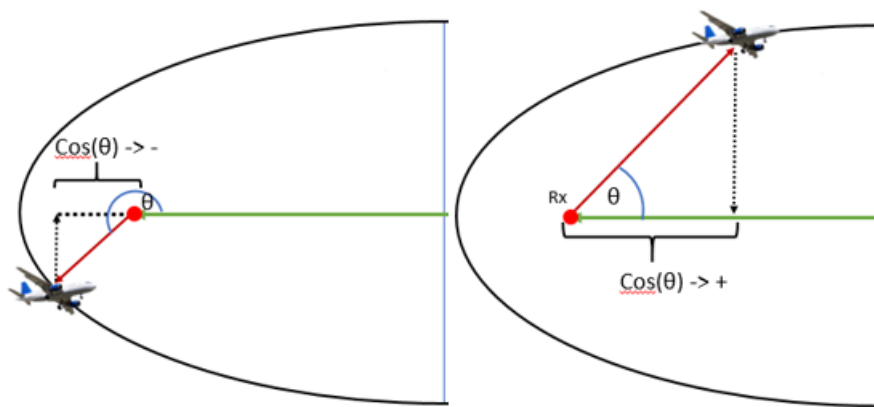


Figura 3-18 Signo del  $\cos(\theta)$  según el valor de  $\theta$  [AP]

Conociendo el valor de la coordenada "X" sobre la línea base, simplemente se debe sustituir en la ecuación explícita de la recta Ec. (3.11) este valor para obtener la coordenada "Y". De esta forma se obtienen las coordenadas del blanco respecto a la línea base.



Figura 3-19 Coordenadas "X" e "Y" respecto de la línea base

### 3.3 Geolocalización de blancos

Aplicando el método detallado en el punto 3.2.2, se puede conocer la posición relativa del objetivo respecto del receptor. Sin embargo, esta posición relativa no es útil para su representación sobre un mapa mediante coordenadas de Latitud y Longitud. Es, a partir de la posición inicial del receptor (en coordenadas terrestres) y, conociendo el ángulo real de la línea Blanco-Rx que forma con la horizontal (el paralelo terrestre que atraviesa el Rx), como se obtiene su geolocalización. Como ya fue retratado en el punto 3.2.1, el emplazamiento de la antena del receptor, se encuentra ubicado en la Escuela Naval Militar, concretamente en las inmediaciones de los laboratorios del CUD, y su geolocalización se corresponde con las siguientes coordenadas:

- Radar\_Lat: 42.397763° N
- Radar\_Lon: 8.706672° W

Resulta importante mencionar, que aquellas coordenadas de componente S ó W serán tratadas con signo negativo.

```

6 - radar_lat = 42.397763;
7 - radar_lon = -8.706672;
8 - ioo_lat = 42.44465739681575;
9 - ioo_lon = -8.660041334987;
    
```

Figura 3-20 Coordenadas terrestres del receptor e IO [AP]

Al poseer las coordenadas “X” e “Y” respecto a la línea base (las cuales se denominarán  $x'$  e  $y'$ ), se puede obtener el valor de la distancia de la recta (R) que une al receptor con el blanco mediante:

$$R = x' / \cos(\theta) \tag{3.18}$$

Durante el desarrollo de la determinación de la posición del blanco con respecto a la línea base establecida por la unión del Rx-Tx, se trabaja con el ángulo  $\theta$ , el cual consiste en el ángulo que subyace entre la línea Blanco-Rx y la línea base. Sin embargo, para alcanzar la geolocalización de los blancos, se debe trabajar con los meridianos y paralelos terrestres como referencia, por este motivo, el ángulo con el que se debe trabajar es “ $\Phi$ ”. Este ángulo es el que subyace entre la línea Blanco-Rx y el paralelo terrestre (en vez de la línea base).

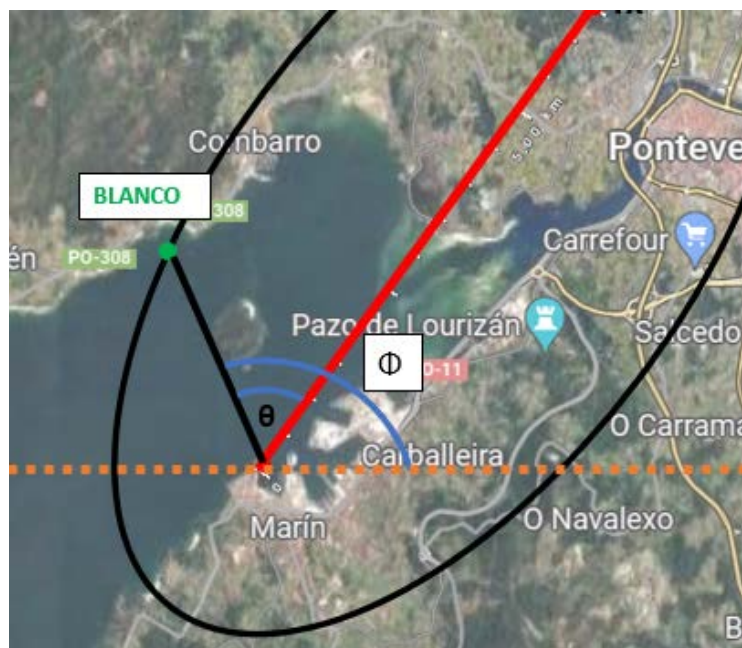


Figura 3-21 Diferencia gráfica entre “ $\theta$ ” y “ $\Phi$ ” [AP]

En base a la magnitud obtenida de la recta (R) que une blanco y receptor, se puede hallar cuantos metros se encuentran separados el blanco y el receptor sobre los ejes “X” e “Y” reales (es decir sobre el paralelo y meridiano terrestre que pasan por el receptor). Estas diferencias de longitud, reciben la nomenclatura de “x” e “y” y se obtienen mediante el uso del ángulo  $\Phi$  de la forma:

$$x = R * \cos(\Phi) \tag{3.19}$$

$$y = R * \text{sen}(\Phi) \tag{3.20}$$

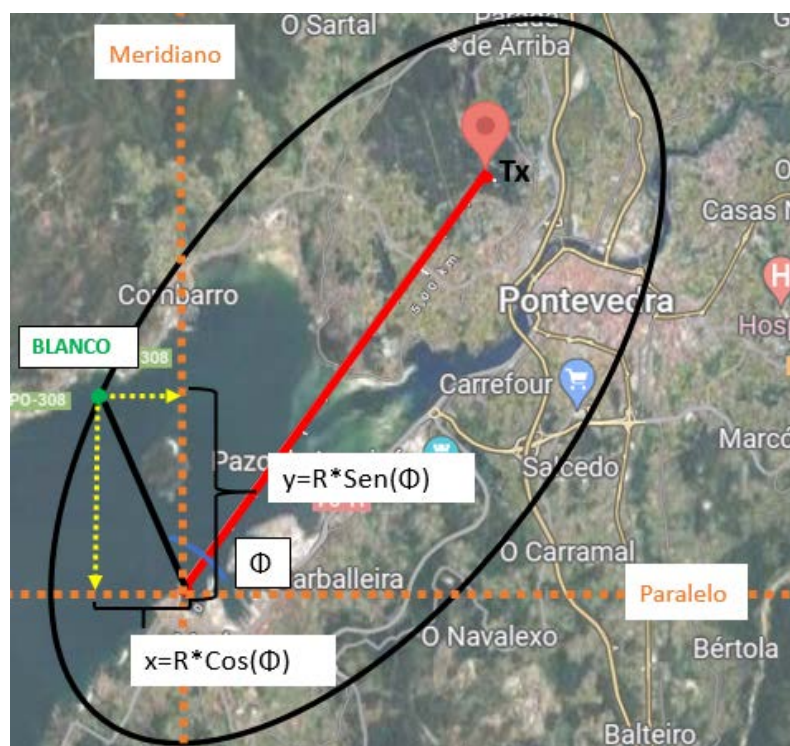


Figura 3-22 Ejemplo de la obtención de las coordenadas "X" e "Y" [AP]

Finalmente, para poder geolocalizar el blanco, es necesario convertir estos valores “x” e “y”, que se encuentran en metros a valores en grados y minutos de longitud y latitud respectivamente.

Para dicha labor, es necesario conocer cuantos metros hay en un minuto de latitud y cuantos en uno de longitud. En el caso de la latitud, un minuto de latitud equivale a una milla náutica, es decir, 1852m, no obstante, en el caso de su contraparte, la longitud, es más complejo. La complejidad viene dada debido a que un minuto de longitud no vale siempre lo mismo, sino que su valor depende de la latitud en la que se esté midiendo. Como todas las detecciones se realizarán en latitudes muy próximas a la del receptor, emplearemos esta latitud para el cálculo de cuantos metros existen dentro de un minuto de longitud.

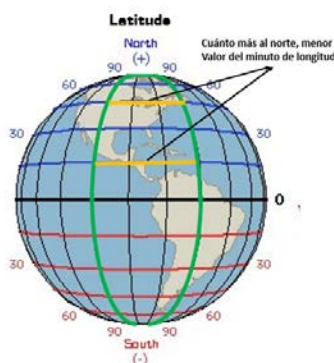


Figura 3-23 Diferencia del valor de la longitud en función de la latitud [62]

Por lo tanto, para realizar los cálculos con la intención de definir los metros dentro de un minuto de longitud, es necesario definir previamente:

- $R_t$ : Radio medio terrestre, es equivalente a 6.371 km, cabe destacar que el radio terrestre varía según la latitud [63].
- $R_{te}$ : Radio terrestre medido en el Ecuador, es equivalente a 6.378,137 km. A modo complementario, esta medición realmente es el radio en el Ecuador del elipsoide del modelado geodésico común WGS84 [64].
- $R_{tp}$ : Radio terrestre medido en los polos terrestres, es equivalente a 6.356,7523142 km. Al igual que  $R_{te}$ , el  $R_{tp}$  es radio en los polos del elipsoide del modelado geodésico común WGS84 [64].

Así pues, los metros contenidos en un grado de longitud ( $metros_{grados}$ ) vendrán determinados por la expresión:

$$metros_{grados} = \frac{\pi * R_t * 1000 * \cos(latitud)}{180 * \sqrt{1 - e^2 * (\text{sen}(latitud))^2}} \quad (3.21)$$

siendo “e”:

$$e = \sqrt{\frac{R_{te}^2 - R_{tp}^2}{R_{te}^2}} \quad (3.22)$$

Tras este cálculo, se deben convertir los metros de “x” e “y” en grados (en lo que se llamará  $grados_x$  y  $grados_y$ ), para ello se realizan las siguientes operaciones:

$$grados_x = x * metros_{grados} \quad (3.23)$$

$$grados_y = y * (1852 * 60) \quad (3.24)$$

Los 1852m se encuentran multiplicados por 60 ya que esos son los metros contenidos en un minuto de latitud y se está trabajando con grados.

El paso final, consiste en añadir esta diferencia de grados entre el blanco y el receptor, a la posición conocida del receptor, hallando la posición geográfica del receptor, mediante las siguientes operaciones:

$$Long_{target} = Radar_{Long} + grados_x \quad (3.25)$$

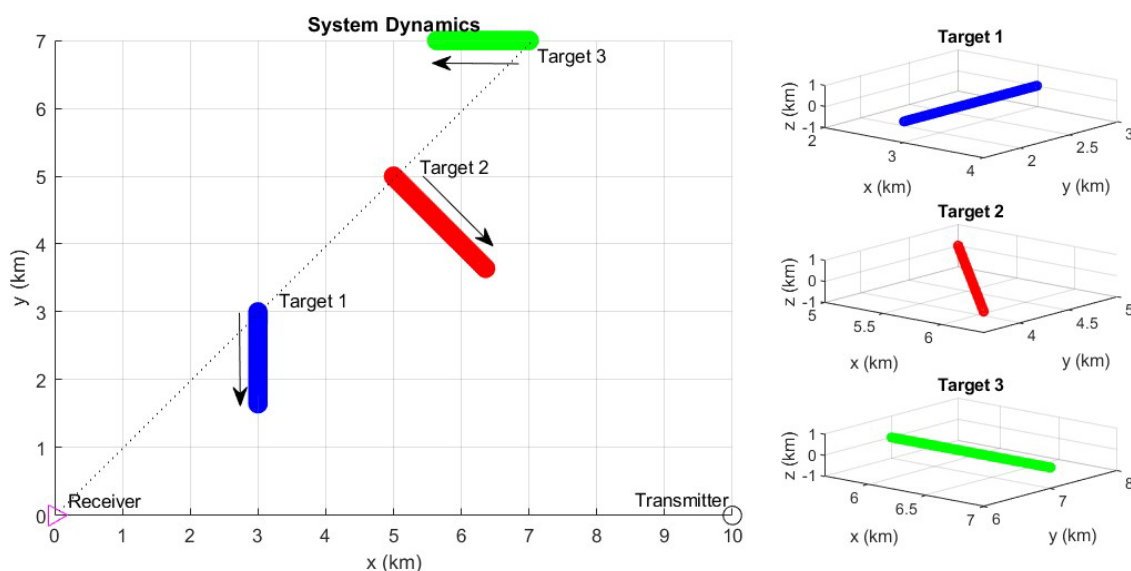
$$Lat_{target} = Radar_{lat} + grados_y \quad (3.26)$$

### 3.4 Escenarios simulados

El código ha sido sometido a distintas pruebas, con el objetivo de corroborar su efectividad en la determinación de la posición de distintas detecciones obtenidas por el receptor. Por ello, es necesario observar si las determinaciones se producen correctamente en situaciones con o sin inclinación de la línea base, con distintas orientaciones de la antena del receptor, con detecciones por debajo y por encima de la orientación de dicha antena y, finalmente en el escenario más parecido a la realidad. En total se sometió el código a 6 escenarios distintos, en los cuales se ha ido alternando entre blancos estáticos o en movimiento, se realizaron variaciones de la posición de los blancos, así como de la orientación de la antena y la inclinación de la línea base. No obstante, únicamente se mostrarán dos, el escenario inicial por ser el escenario que más distan del resto, y el escenario final, por aunar todas las características que se pueden dar, presentando blancos estáticos y en movimiento, y en las posiciones correspondientes al sector real de vigilancia del radar.

### 3.4.1 Escenario inicial

El primer escenario, se trata de un escenario inicial sencillo. En esta situación, el receptor si mantiene su posición en la Escuela Naval Militar, sin embargo, el transmisor se ha supuesto a la misma latitud que el receptor y desplazado 10 km al este (por ello, “c” valdrá 5000m). Todo ello con la intención de trabajar con una inclinación de la línea base de  $0^\circ$ , por otro lado, la orientación de la antena será de  $45^\circ$ . Se han producido detecciones durante 12 intervalos de tiempo (CPIs), donde por cada intervalo de tiempo se han producido aproximadamente unas 120 detecciones correspondientes a 3 blancos dinámicos. El escenario se ha supuesto de la siguiente manera:



**Figura 3-24 Escenario inicial [AP]**

En el escenario, todos los contactos se encuentran, en el primer instante de la detección, sobre la línea de la orientación de la antena de  $45^\circ$  (línea punteada), separados del receptor 4,2426, 7,0710 y 9,8994 km (target 1, 2 y 3 respectivamente). Conforme se van sucediendo los instantes de detección, los contactos se irán separando de esta línea.

Al realizar la simulación de los blancos no se tuvo en cuenta su posición real en el mapa, es por ello que existe la posibilidad de que estos blancos sean representados sobre tierra firme. El objetivo final de este escenario es el de realizar un test inicial de código bajo condiciones favorables y sencillas.

### 3.4.2 Escenario final

Este escenario reúne las condiciones estudiadas en casos anteriores, por lo que se trata del escenario más completo. Por ello, presenta una situación muy similar a la realidad en la que: la línea base se encuentra inclinada unos  $54^\circ$  respecto de la horizontal, la antena tiene una orientación de  $135^\circ$  (sobrepasando la vertical de  $90^\circ$ ), las detecciones se producen a ambos lados de la orientación de la antena, dos blancos se encuentran estáticos y otro en movimiento, y existen detecciones realizadas más a la izquierda del receptor tal y como se explicó en la Figura 3-17 y Figura 3-18. En este caso, el IO ya está situado donde se encuentra en la realidad, por ello “c” tiene un valor de 3235,15 m (6470,3 m de distancia focal). El escenario tiene la siguiente forma:

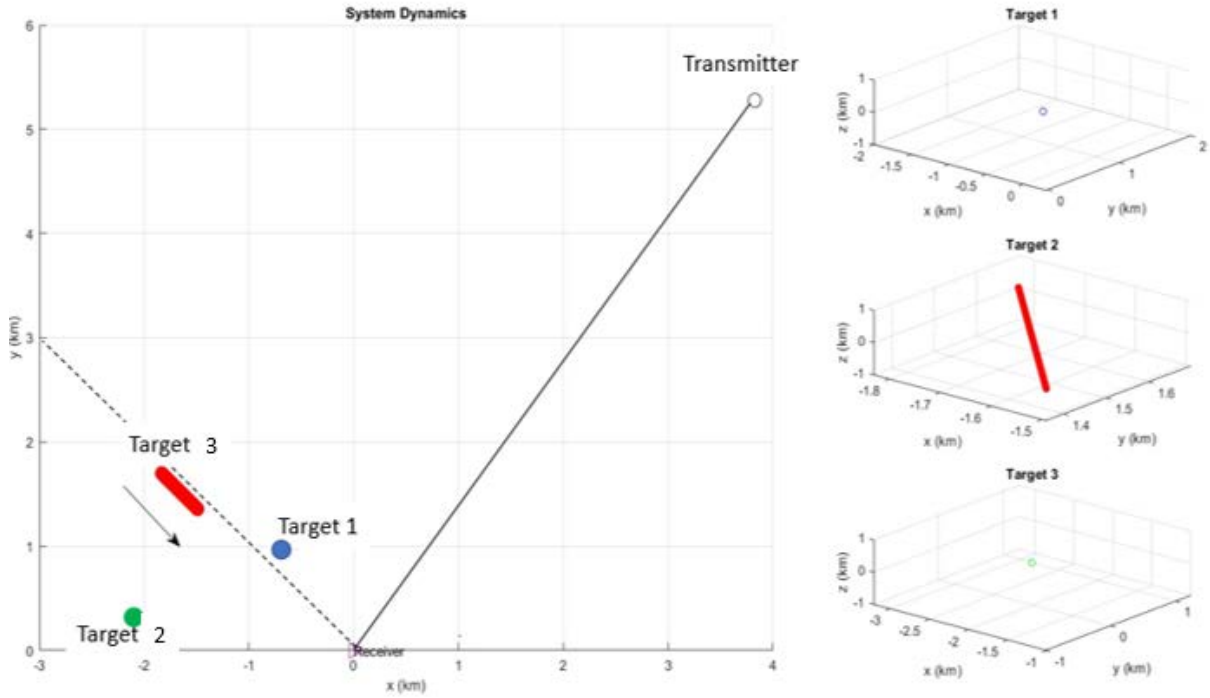


Figura 3-25 Escenario final [AP]

Cabe destacar que, en esta situación se han producido detecciones para 125 CPIs con unas 6 detecciones por cada CPI (unas 2 por blanco).

En esta situación, al tratarse de un escenario que simula una posible situación real, los blancos si deben salir representados sobre el agua y con posiciones coherentes. Sus posiciones respecto de receptor son:

- Target 1: 10° a la derecha de la orientación de la antena a 1,187 km
- Target 2: 30° a la izquierda de la orientación a 2,220 km
- Target 3: 2° a la izquierda de la orientación a 2,498 km

El objetivo de escenario es de realizar la última comprobación del código en las condiciones más desfavorables y probables posibles. 30° a la izquierda de la orientación a 2,220 km



## 4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

### 4.1 Resultados y análisis de las simulaciones

En este apartado se refleja el grado consecución del éxito en las pruebas realizadas, en función de la medida en la que los resultados se ajusten al escenario propuesto. Este paso a modo de validación, cuenta con una gran importancia puesto que, gracias a los resultados obtenidos en los distintos escenarios y su posterior análisis, se hace posible la detección de errores y, consecuentemente la mejora del código y base matemática.

#### 4.1.1 Resultados escenario inicial

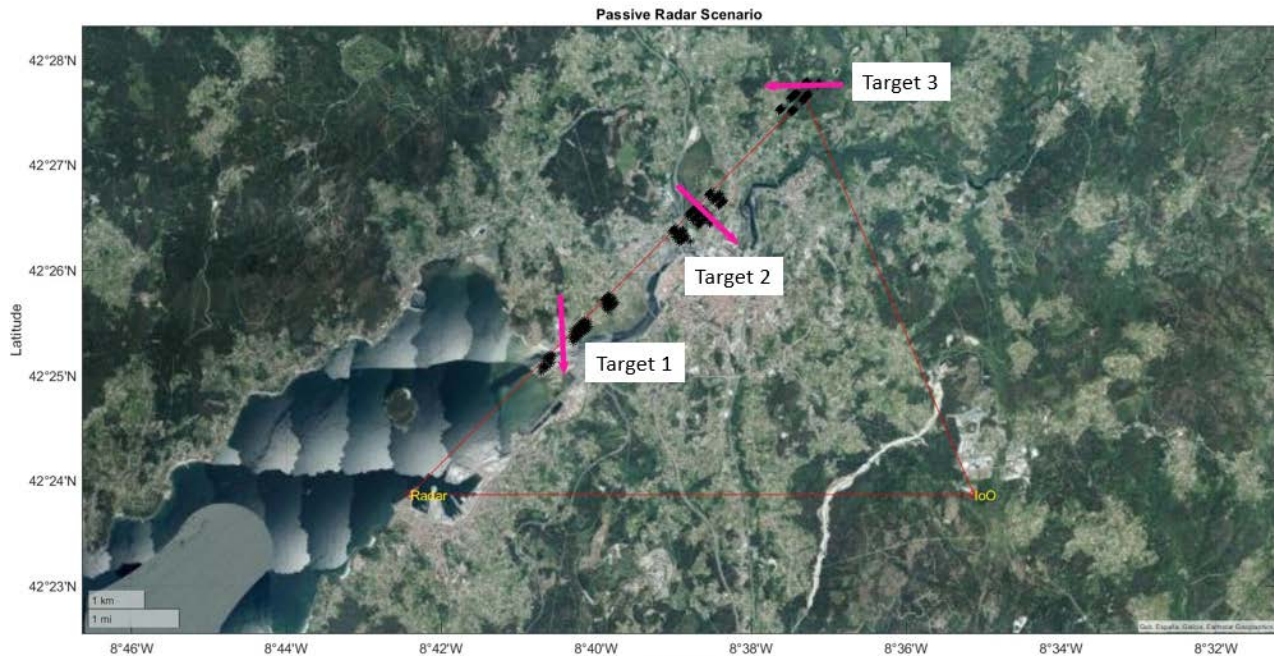
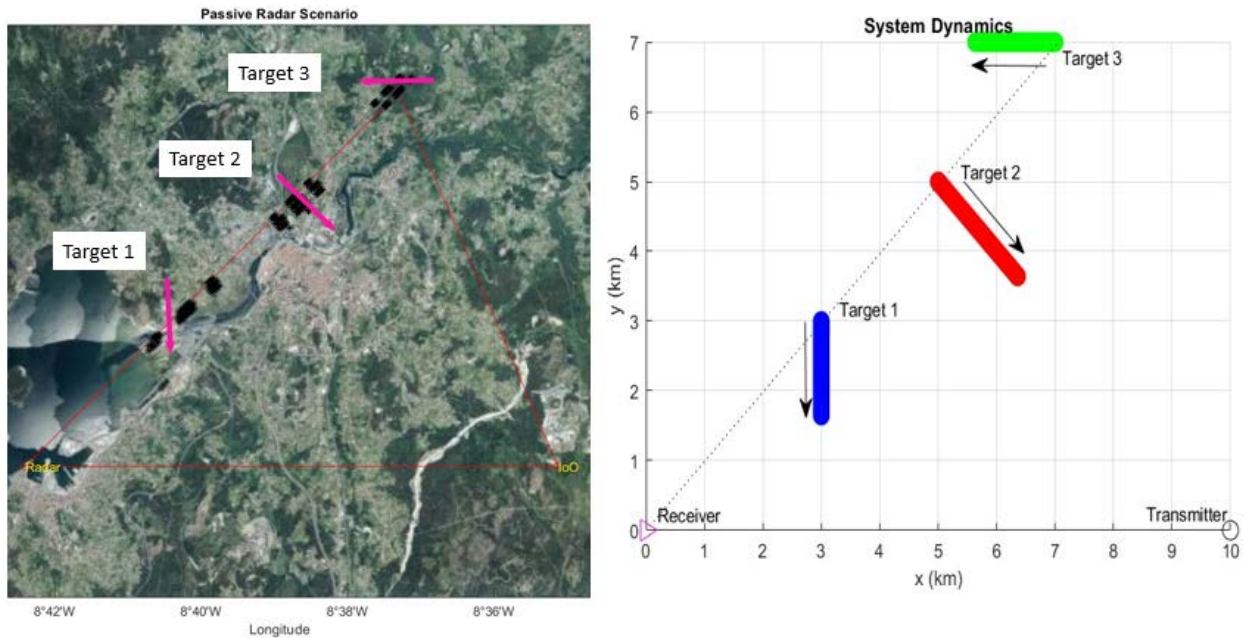


Figura 4-1 Mapa satélite, resultados del escenario inicial [AP]

En esta ocasión, se ha preferido representar solo un triángulo Rx-Tx-blanco con la intención de no ensuciar el mapa. Cabe destacar que la aparición de múltiples detecciones para cada contacto tiene especial presencia en este escenario, debido a que en el primer escenario simulado, la simulación de las detecciones se hizo asumiendo unas malas condiciones de transmisión de la onda por parte del IO, llegando a dar la sensación de la existencia de 9 contactos. Como ya se mencionó anteriormente, estos contactos pueden llegar a ser representados sobre tierra debido a que no es un escenario realista.

Se puede observar que los tres contactos se encuentran a 45° de la horizontal (coincidiendo con la orientación de la antena), esto demuestra que la representación es acertada, al menos en la determinación angular de los blancos. Además, observando la sucesiva representación de los blancos en los distantes instantes de tiempo, y tomando como posiciones iniciales sobre aquellas sobre línea roja del triángulo Rx-Tx-blanco, se puede determinar el rumbo de dichos contactos. Este rumbo viene representado por las flechas rosas y comparándolas con los rumbos reales:



**Figura 4-2 Comparativa de rumbos del escenario inicial [AP]**

De esta forma, se observa que los rumbos coinciden en gran medida, el Target 1 con un rumbo sur, el 2 hacia el sureste y el 3 con un rumbo de componente oeste.

Finalmente, se deben comprobar las distancias iniciales obtenidas respecto del receptor, ya que, observando la buena representación angular conseguida, en caso de una buena representación en distancia, se dispone, por lo tanto, de una excelente representación de la determinación de la posición de los blancos:

| Obtenido (km)    | Teórico (km) |
|------------------|--------------|
| Target 1: 9.9066 | 9.8994       |
| Target 2: 7.0789 | 7.0710       |
| Target 3: 4.2426 | 4.2690       |

**Tabla 4-1 Comparación distancias: escenario inicial**

Con la tabla 4-1 se observa que las posiciones calculadas tienen una precisión de entre 5-25 m, por lo que la representación ha sido exitosa, hay que destacar que esta diferencia de distancias se debe a la simulación de detecciones, la cual es la que aporta las distancias biestáticas. A mayores, en este caso, las múltiples detecciones de un mismo contacto sí que generan cierto problema de cara a la interpretación de los resultados, ya que hay detecciones que sí se alejan demasiado de la distancia teórica (en los rangos de 100m).

### 4.1.2 Resultados escenario final

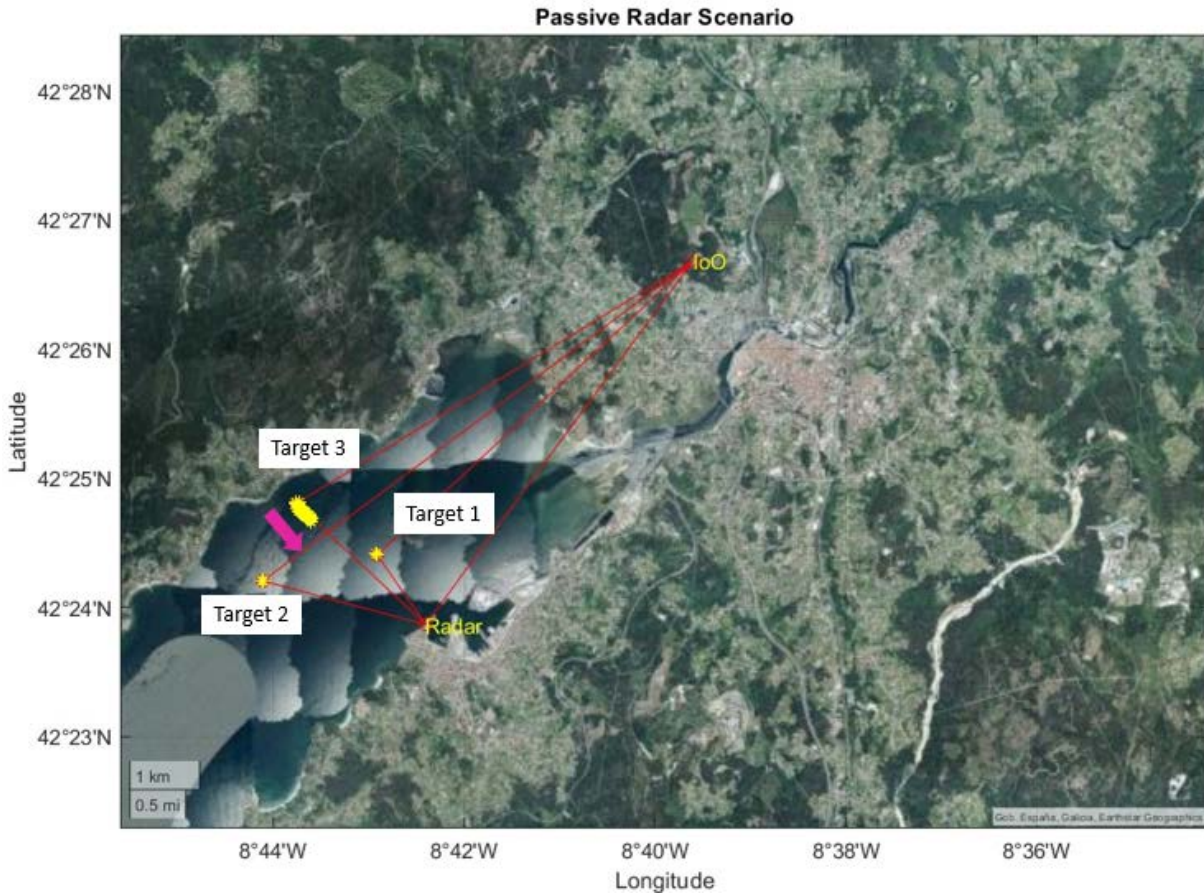


Figura 4-3 Mapa satélite, resultados del escenario final [AP]

En este escenario, existen muchas menos detecciones por contacto (aproximadamente 2), esto ha permitido dibujar los tres triángulos biestáticos sin ensuciar de sobre manera el mapa. En este último escenario, se mejoraron las condiciones de transmisión de las señales en la simulación, lo que permitió obtener unas detecciones más certeras con menos detecciones por blanco.

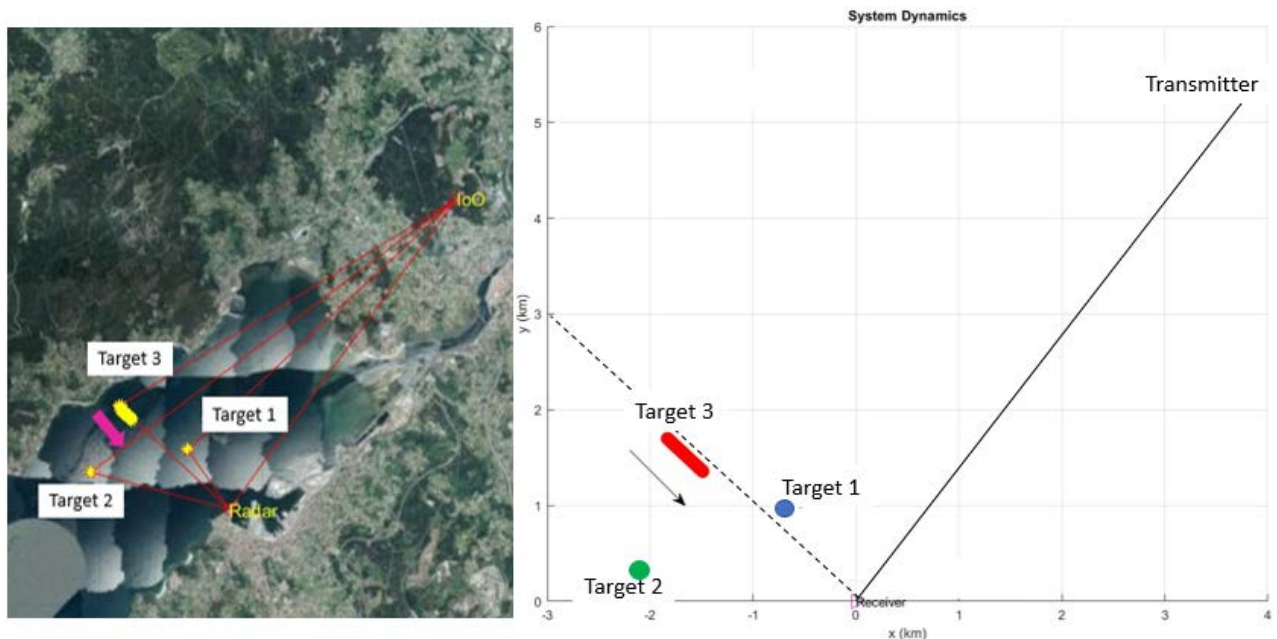


Figura 4-4 Comparativa de rumbo del escenario final [AP]

En esta ocasión, el escenario ha sido simulado en las condiciones en las que el radar actuará en la realidad, por ese motivo, los contactos representados deben ser localizados en lugares coherentes, como es el caso. Respecto a la representación angular del contacto, el primero presenta un ángulo de 125° sobre la horizontal (abierto 10° a la derecha de la orientación del receptor), el tercero de 137° (2°, a la izquierda) en su posición inicial y el segundo de 165° (30° a la izquierda), coincidiendo con los resultados teóricos. Así, se corrobora la representación angular. Por otra parte, el rumbo del tercer contacto, coincide positivamente en un rumbo sureste, lo que confirma una buena representación en la evolución espacio-temporal del contacto.

Terminando con la comparativa de distancias iniciales respecto al receptor:

| Obtenido (km)    | Teórico (km) |
|------------------|--------------|
| Target 1: 1.1888 | 1.1877       |
| Target 2: 2.2257 | 2.2203       |
| Target 3: 2.5030 | 2.4987       |

**Tabla 4-2 Comparación distancias: escenario final**

La coincidencia espacial en distancia es evidente, teniendo un error de unos 10 m, se demuestra que el código es válido para la determinación y representación de blancos en escenarios con inclinación de línea base, orientación de antena, dinamismo de contactos y con contactos en las secciones de las elipses más allá de los focos.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se presentan las ideas principales del trabajo realizado, evaluando la consecución de los objetivos establecidos al inicio de este. También se describe alguna opción que posibilite continuar con la línea de trabajo y profundizar en la investigación de esta tecnología.

### 5.1 Conclusiones y cumplimiento de los objetivos

De las múltiples conclusiones que derivan del desarrollo del trabajo, se pueden extraer como exitosos no uno, sino dos métodos simulados a través del software de MATLAB. El primero de ellos es el explicado a lo largo del apartado 3 y se fundamenta en la búsqueda de la intersección entre la elipse (asociada a la distancia biestática) y la recta referente a la dirección de llegada. El segundo de los métodos es el desarrollado en el Anexo IV y, se vale de una solución más trigonométrica. Mediante ambos métodos, se ha logrado determinar el dato fidedigno de la posición de los distintos blancos y en distintas situaciones. Así pues, este se posicionaba como el principal de los objetivos de este trabajo, y se ha logrado ampliar desarrollando un segundo método alternativo para realizar la misma función.

Respecto al segundo objetivo, se ha conseguido con excelentes resultados, convertir el dato de la posición obtenida en coordenadas cartesianas, logrando representarlo sobre un mapa satélite en el cual se encuentra geolocalizado. De esta manera se ha facilitado, en gran medida, la labor de análisis de la situación marítima de la zona observada, pudiendo ser consciente de la evolución espacial y temporal que sufren los contactos, obteniendo su rumbo y velocidad.

A mayores, los objetivos secundarios también han sido alcanzados puesto que, en el desenlace del estado del arte, se ha podido enmarcar la historia de esta tecnología, desde sus inicios y popularización hasta su decadencia y posterior resurgimiento hasta su estado actual. También se han explicado los principios de funcionamiento de estos sistemas, permitiendo conocer cómo se comportan y que factores son necesarios para el procesamiento de sus señales. Todo esto con el objetivo de poner en contextualización del lector, el origen de los datos de partida del desarrollo de este trabajo, como lo son la distancia biestática y el DOA.

Por lo tanto, este tipo de tecnología se encuentra actualmente en un momento de auge sostenido dentro de su marco histórico. La opinión generalizada confluye hacia una idea común, la buena perspectiva de futuro que presenta y lo prometedor que pueden llegar a ser estos sistemas. Todo esto se debe a sus buenas capacidades y prestaciones bajo condiciones favorables y a que, en combinación con el ahorro energético y la limpieza espectral, se llega a debatir que, en ciertos ámbitos, puedan llegar a sustituir a radares activos en sus labores de vigilancia.

Por otra parte, la repercusión de estos sistemas a nivel global, está siendo muy relevante, especialmente, en los Departamentos de Defensa de las distintas naciones. Ellos son los principales precursores de su investigación, investigaciones movidas por la búsqueda de sus ventajas tácticas, como es el caso de la discreción que tanto caracteriza a estos radares.

Esta relevancia está hecha presente de facto, por el propio Ministerio de Defensa español, el cual tiene presente esta tecnología entre sus líneas de acción de I+D+I, explorando distintos proyectos de vigilancia aérea (como el IDEPAR) para sentar las bases en este ámbito y continuar en su estudio.

Como conclusión final, se puede determinar que los resultados obtenidos en este trabajo, son bastante alentadores y deben llamar a la continuación de la investigación en este ámbito, donde siempre está presente la posibilidad de ser pionero de la mano de la innovación, pues se trata de un campo altamente explotable.

## 5.2 Líneas futuras

Respecto a las líneas futuras a establecer entorno a este trabajo, surgen dos en contexto temporales muy distintos. La primera se trata de una línea futura para abordar en un futuro próximo con la intención de seguir sentando las bases de esta tecnología y su desarrollo. En contraparte, la segunda línea consiste en un objetivo final hipotético que podría ser alcanzado en un futuro más avanzado.

### 5.2.1 Varios IO en la ría de Pontevedra

Esta línea futura busca la realización del mismo proyecto, valiéndose de la misma antena receptora, sin embargo, en este supuesto, se usarían múltiples IO de la ría de Pontevedra con la finalidad de resolver los problemas presentes en el punto 3.1.3, ante los que el sistema del presente trabajo se encuentra “ciego”.

Este supuesto, se plantea como posible línea futura ya que, es posible emplear varios pares de transmisores y receptores para ubicar un objetivo en coordenadas cartesianas mediante la determinación del punto donde las elipses se intersectan, tal y como menciona el punto 2.3.1. Para ello, se puede emplear un transmisor y múltiples receptores o, múltiples transmisores y un receptor. No obstante, cuando se tienen múltiples mediciones, pueden generarse falsos objetivos, los cuales se presentan cuando las intersecciones de las elipses no concuerdan con las posiciones reales del objetivo. Un obstáculo adicional, consiste en que la cantidad de combinaciones posibles de mediciones crece de gran manera conforme se incrementa la cantidad de objetivos y transmisores. Por ello, es conveniente contar con algoritmos rápidos para calcular las intersecciones de las elipses, y emplear el mínimo número de IO.

### 5.2.2 Sistemas biestáticos pasivos integrados en buques de guerra

Esta situación sería posible al alcanzar el pico del desarrollo de esta tecnología, puesto que, los receptores pasivos de estos sistemas irían integrados en los buques. Sin embargo, para que esto fuese viable, los IO de los que se aprovecharan estos receptores, deberían tener una cobertura lo suficientemente extensa y versátil como para poder ser utilizada en distintas partes del mundo indistintamente. Esta característica solo podría ser cumplida por los IO satelitales.

En esta situación los buques dispondrían de unos radares de vigilancia para poder emplear con completa discreción. El resto de buques o contactos aéreos desconocerían que están siendo vigilados, lo que presenta varias ventajas:

- En primer lugar, ante el ataque de un misil cuyo seeker busque señales radáricas, existiría la posibilidad de dirigir otro misil aliado contra el misil enemigo a modo defensivo (guiado a través del radar pasivo), sin establecerse como un blanco para este.

- En situaciones de crisis y tensión, donde se busca evitar la escalada del conflicto, muchas acciones, dependiendo de la situación, pueden ser vistas como actos hostiles. Este, puede ser el caso de la iluminación de alguna plataforma con radares de vigilancia, lo que impide la realización de labores de recolección de inteligencia en escenarios donde sería muy provechoso. Con el sistema pasivo se podrían realizar esta recolección de inteligencia, evitando la escalada del conflicto al no mostrar ningún tipo de amenaza.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Biografía de Robert Watson-Watt». [https://www.biografiasyvidas.com/biografia/w/watson\\_watt.htm](https://www.biografiasyvidas.com/biografia/w/watson_watt.htm) (accedido 4 de marzo de 2023).
- [2] «Sir Robert Alexander Watson-Watt | British physicist | Britannica», 4 de enero de 2023. <https://www.britannica.com/biography/Robert-Alexander-Watson-Watt> (accedido 4 de marzo de 2023).
- [3] «Pin on mapmania», *Pinterest*. <https://www.pinterest.com/pin/italian-kingdom--602778731374623214/> (accedido 4 de marzo de 2023).
- [4] S. Sean S., *Technical history of the beginnings of radar*. 1986.
- [5] J. Gouhg, *Watching the Skies: A History of Ground Radar for the Air Defence of the United Kingdom by the Royal Air Force from 1946 to 1975*. HMSO; 1st edición (1 Enero 1993), 1993.
- [6] «Chain Home Radar Station near Dover from the air». <https://www.webbaviation.co.uk/aerial/picture.php?/29010/categories> (accedido 4 de marzo de 2023).
- [7] H. Griffiths, «Radar system lecture notes». University College London, 2009.
- [8] H. Griffiths y N. Willis, «Klein Heidelberg The First Modern Bistatic Radar System», *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 46, n.º 4, pp. 1571-1588, oct. 2010, doi: 10.1109/TAES.2010.5595580.
- [9] hmong.wiki, «Klein Heidelberg ContenedoyHistoria». [https://hmong.es/wiki/Klein\\_Heidelberg\\_Parasit](https://hmong.es/wiki/Klein_Heidelberg_Parasit) (accedido 4 de marzo de 2023).
- [10] «De evolutie van de radar tijdens de tweede wereldoorlog: Klein-Heidelberg». <http://server.idemdito.org/pics/mil/electro/klein-heidelberg.htm> (accedido 4 de marzo de 2023).
- [11] R. G. Colombia Bogotá, «Fundamentos de radar - Principios Básicos Radar». <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Principio%20Radar.es.html> (accedido 4 de marzo de 2023).
- [12] «NATO. Symposium on passive and noise radar». University College London, nATO DRG Symposium, Tech Rep.
- [13] H. D. Griffiths y N. R. W. Long, «Television-based bistatic radar», *IEE Proc. F Commun. Radar Signal Process.*, vol. 133, n.º 7, p. 649, 1986, doi: 10.1049/ip-f-1.1986.0104.
- [14] J. Kurian, «Silent Sentry». Looockheed Martin, 2005.
- [15] M. Conti, C. Moscardini, y A. Capria, «Dual-polarization DVB-T passive radar: Experimental results», may 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485126.
- [16] Nurw, «DEFENSE STUDIES: The HA100 Passive Radar from Thales to Play a Role», *DEFENSE STUDIES*, 14 de julio de 2010. <http://defense-studies.blogspot.com/2010/07/ha100-passive-radar-from-thales-to-play.html> (accedido 4 de marzo de 2023).



- [17] SOPT, «Boletín de observación tecnológica en defensa». SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, 2019.
- [18] «Donde estamos - Sobre Nosotros», *Navantia*. <https://www.navantia.es/es/sobre-nosotros/donde-estamos/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [19] MP. Jarabo-Amores, «Boletín 38 de observación tecnológica de la Defensa». SUBDIRECCIÓN GENERAL DE TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, 2013.
- [20] «Formative Consultores Logo-Ministerio-de-Defensa - Formative Consultores». <http://www.formativeconsultores.com/clientes-2/attachment/logo-ministerio-de-defensa/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [21] «European Defence Agency (EDA) - Global Careers Fair». <https://www.globalcareersfair.com/job-recruiter/european-defence-agency-eda/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [22] J. M. Muñoz Ferreras, «Enfocado de imágenes de radar de apertura sintética inversa. Nuevas técnicas y aplicaciones», phd, E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), 2008. Accedido: 5 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/1133/>
- [23] «Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging geometry model», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Inverse-synthetic-aperture-radar-ISAR-imaging-geometry-model\\_fig1\\_360079608](https://www.researchgate.net/figure/Inverse-synthetic-aperture-radar-ISAR-imaging-geometry-model_fig1_360079608) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [24] «MQ-9 Reaper drone being upgraded to meet new geopolitical reality», *New Atlas*, 24 de abril de 2021. <https://newatlas.com/military/mq-9-reaper-drone-upgrade-near-peer-threats/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [25] M.-P. Jarabo-Amores *et al.*, «IDEPAR: a multichannel digital video broadcasting-terrestrial passive radar technological demonstrator in terrestrial radar scenarios», *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 11, n.º 1, pp. 133-141, 2017, doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0087.
- [26] DRAFTING, «Seis de los principales centros de producción y emisión de radio y televisión abren por vez primera sus puertas», *Panorama Audiovisual*, 30 de octubre de 2013. <https://www.panoramaaudiovisual.com/2013/10/30/seis-de-los-principales-centros-de-produccion-y-emision-de-radio-y-television-abren-por-vez-primer-a-sus-puertas/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [27] «Campus La Marañosa». [https://www.inta.es/INTA/es/donde-estamos/Centro\\_1480065890248](https://www.inta.es/INTA/es/donde-estamos/Centro_1480065890248) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [28] «Mapas de Bing», *Mapas de Bing*. <https://www.bing.com/maps?q=estaci%C3%B3n+de+TV+de+Jerez+de+la+Frontera&FORM=HDRSC4&cp=36.571689%7E-6.221496&lvl=11.4> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [29] «Phantom Drone - Dji Phantom 3 Advanced Transparent, HD Png Download - kindpng». [https://www.kindpng.com/imgv/ombbwh\\_phantom-drone-dji-phantom-3-advanced-transparent-hd/](https://www.kindpng.com/imgv/ombbwh_phantom-drone-dji-phantom-3-advanced-transparent-hd/) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [30] H. Kuschel, D. Cristallini, y K. E. Olsen, «Tutorial: Passive radar tutorial», *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, n.º 2, pp. 2-19, feb. 2019, doi: 10.1109/MAES.2018.160146.
- [31] «INTRODUCCIÓN». [https://www.geocities.ws/ingenieria\\_antenas/texto1.htm](https://www.geocities.ws/ingenieria_antenas/texto1.htm) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [32] L. Silveira, «Estaciones de radio AM, FM, digitales y en línea. ¿Cual es la diferencia?», *Blog BRLOGIC*, 9 de julio de 2019. <https://blog.brlogic.com/es/estaciones-de-radio-am-fm-digitales-y-en-linea-cual-es-la-diferencia/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [33] Geeklandia., «Guía de los satélites que orbitan la tierra», *THE\_WISE\_BYTE*, 26 de enero de 2023. <https://thewisebyte.com/guia-de-los-satelites-que-orbitan-la-tierra/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [34] Kuschel, H, «Experimental passive radar systems using digital illuminators (DAB/DVB-T).» Interna\_tional Radar Symposium (IRS), 2014.
- [35] G. Bournaka, A. Baruzzi, J. Heckenbach, y H. Kuschel, «Experimental validation of beamforming techniques for localization of moving target in passive radar», en *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, may 2015, pp. 1710-1713. doi: 10.1109/RADAR.2015.7131274.

- [36] F. Colone, P. Falcone, C. Bongioanni, y P. Lombardo, «WiFi-Based Passive Bistatic Radar: Data Processing Schemes and Experimental Results», *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48, n.º 2, pp. 1061-1079, abr. 2012, doi: 10.1109/TAES.2012.6178049.
- [37] K. A.-M. M. GatesAir, «GatesAir: Redes de frecuencia única (SFN)», *GatesAir, Inc.* <https://gatesairinc.com/solutions/single-frequency-networks-sfn> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [38] X. He, M. Cherniakov, y T. Zeng, «Signal detectability in SS-BSAR with GNSS non-cooperative transmitter», *IEE Proc. - Radar Sonar Navig.*, vol. 152, n.º 3, pp. 124-132, jun. 2005.
- [39] Cherniakov, M., Saini, R., Zuo, R., and Antoniou, M., «Space-surface bistatic synthetic aperture radar with global navigation satellite system transmitter of opportunity experimental results. IET Proceedings Radar, Sonar and Navigation», vol. Vol. 1, n.º 447–458.
- [40] D. Cristallini *et al.*, «Space-based passive radar enabled by the new generation of geostationary broadcast satellites», en *2010 IEEE Aerospace Conference*, mar. 2010, pp. 1-11. doi: 10.1109/AERO.2010.5446694.
- [41] «TV Digital Via Satélite». [http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2007\\_2008/MEEC/Trabalho\\_9/html/html/previsoes.htm](http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2007_2008/MEEC/Trabalho_9/html/html/previsoes.htm) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [42] Saini, R., and Cherniakov, M., «DTV signal ambiguity function analysis for radar application. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation», vol. 152, junio de 2005.
- [43] Harms, H. A., Davis, L. M., and Palmer, J., «Understanding the signal structure in DVB-T signals for passive radar detection». 2010 IEEE Radar Conference, mayo de 2010.
- [44] Melvin, W., and Scheer, J., *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [45] «Connected-component labeling», *Wikipedia*. 26 de enero de 2023. Accedido: 5 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Connected-component\\_labeling&oldid=1135703955](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Connected-component_labeling&oldid=1135703955)
- [46] «Ruido gaussiano blanco aditivo - Additive white Gaussian noise - abcdef.wiki». [https://es.abcdef.wiki/wiki/Additive\\_white\\_Gaussian\\_noise](https://es.abcdef.wiki/wiki/Additive_white_Gaussian_noise) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [47] «Fig. 14 Ruido Blanco Gaussiano En la figura 15 utilizando la función de...», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Ruido-Blanco-Gaussiano-En-la-figura-15-utilizando-la-funcion-de-Matlab-se-observa-un\\_fig8\\_318337560](https://www.researchgate.net/figure/Ruido-Blanco-Gaussiano-En-la-figura-15-utilizando-la-funcion-de-Matlab-se-observa-un_fig8_318337560) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [48] «Fig. 1. Clutter map from the SPANDAR radar corresponding to Wallops run...», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Clutter-map-from-the-SPANDAR-radar-corresponding-to-Wallops-run-12-with-0-o-elevation\\_fig1\\_224714350](https://www.researchgate.net/figure/Clutter-map-from-the-SPANDAR-radar-corresponding-to-Wallops-run-12-with-0-o-elevation_fig1_224714350) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [49] Blackman, S., and Popoli, R., *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*. Artech House Publishers, 1999.
- [50] *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, 1.<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/0471221279.
- [51] «Filtros Kalman». <https://es.mathworks.com/discovery/kalman-filter.html> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [52] «Figura 6 – Ciclo do Filtro de Kalman. Fonte: Adaptado de Jurić, 2015.», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Ciclo-do-Filtro-de-Kalman-Fonte-Adaptado-de-Juric-2015\\_fig6\\_308780687](https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Ciclo-do-Filtro-de-Kalman-Fonte-Adaptado-de-Juric-2015_fig6_308780687) (accedido 5 de marzo de 2023).
- [53] R. Estévez, «Interpolación espacial en QGIS: métodos, procesos y evaluación», *geomapik*, 14 de mayo de 2019. <https://www.geomapik.com/analisis-gis/como-realizar-interpolacion-espacial-qgis-metodos/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [54] «Ecuación de la Elipse». <https://www.fisicalab.com/apartado/ecuacion-elipse> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [55] A. Giovanini, «Elipsoide: o que é e para que serve?», *Adenilson Giovanini*, 18 de diciembre de 2019. <https://adenilsongiovanini.com.br/blog/elipsoide-o-que-e-e-para-que-serve/> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [56] José María Núñez Ortuño, «Radares pulsados, sensores navales». CUD. UVIGO.

- [57] C. V. Rohaut, «Coronel Von Rohaut: Reabastecimiento de combustible en alta mar», *Coronel Von Rohaut*, 25 de mayo de 2016. <https://rohaut.blogspot.com/2016/05/reavituallamiento-en-alta-mar.html> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [58] José María Núñez Ortuño, «Tema 5 Sensores navales, Compresión de pulsos». CUD UVIGO.
- [59] N. J. Willis, *Bistatic Radar*. SciTech Publishing, 2005.
- [60] D. Cristallini y I. Walterscheid, «SAR-GMTI enhanced with simultaneous monostatic and bistatic detections», en *EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, jun. 2014, pp. 1-4.
- [61] «Google Maps», *Google Maps*. <https://www.google.es/maps/place/Torres+de+Telecomunicaciones>
- [62] «Latitude and Longitude: Lines on the Earth», *SchoolWorkHelper*. <https://schoolworkhelper.net/latitude-and-longitude-lines-on-the-earth/> (accedido 9 de marzo de 2023).
- [63] «¿Cuál es el radio de la tierra?», *QueCuriosidades.com*, 21 de septiembre de 2018. <https://quecuriosidades.com/cual-es-radio-tierra/> (accedido 9 de marzo de 2023).
- [64] H. Moritz y H. Moritz, «Geodetic Reference System 1980», *J. Geod.*, vol. 74, n.º 1, pp. 128-133, mar. 2000, doi: 10.1007/s001900050278.

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

Hoy en día, el desarrollo sostenible es un tema prioritario debido a las consecuencias medioambientales que tienen nuestras acciones en el planeta. El desarrollo sostenible implica satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Para lograr este objetivo, se están implementando medidas internacionales a través de acuerdos y convenciones, como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Estas medidas buscan fomentar prácticas sostenibles, como la conservación del medio ambiente, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de energías renovables, entre otras acciones que contribuyen a la creación de un mundo más sostenible.

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología ha permitido la creación de radares de vigilancia marítima cada vez más sofisticados. Sin embargo, estos sistemas pueden tener importantes implicaciones medioambientales, especialmente en términos de consumo de energía y ocupación del espectro electromagnético. En este anexo, se analizarán las ventajas que ofrece el uso de un radar pasivo en el ámbito de la vigilancia marítima (donde se considera que se dan sus principales ventajas medioambientales), enfocándose en los ahorros de costes en consumo de energía, la liberación del espectro electromagnético y la reducción de las emisiones dañinas al medio ambiente.

- **Ahorro de consumo de energía:**

Una de las principales ventajas del radar pasivo es el ahorro de costes de consumo de energía. A diferencia de los radares activos, que requieren el uso de un transmisor de alta potencia, el radar pasivo funciona mediante la recepción de señales electromagnéticas emitidas por otros equipos (los iluminadores de oportunidad en este caso). De este modo, se reduce significativamente el consumo de energía necesario para su funcionamiento.

Esta reducción de costes es especialmente relevante en términos de sostenibilidad a largo plazo, ya que el uso de sistemas de radar activos consume grandes cantidades de energía, lo que a su vez contribuye a una mayor necesidad de producción de energía y a la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. De este modo, el uso de un radar de vigilancia marítima pasivo puede ser una opción más respetuosa con el medio ambiente.

- **Liberación del espectro electromagnético:**

Otra ventaja del radar pasivo es que no ocupa el espectro electromagnético de la misma manera que un radar activo. El espectro electromagnético es un recurso finito que se utiliza para transmitir señales de radio y otros tipos de comunicaciones. Con el avance de la tecnología, el espectro electromagnético se está volviendo cada vez más saturado, lo que significa que la ocupación de este espectro por sistemas de radar puede tener importantes implicaciones medioambientales.

Respecto a este aspecto, el uso de un radar pasivo reduce la cantidad de energía electromagnética transmitida al entorno, lo que disminuye el riesgo de interferencia con otros sistemas y ayuda a liberar el espectro electromagnético. Además, cabe destacar que, el uso de un radar de vigilancia marítima pasivo también puede reducir el riesgo de daños a la fauna marina, ya que los radares activos pueden interferir en los sistemas de navegación y comunicación de algunos animales, como los delfines y las ballenas.

Por lo tanto, como conclusión, al analizar las ventajas del radar marítimo pasivo en las implicaciones medioambientales, se puede observar que el uso de radares pasivos presenta diversas ventajas, visibles

tanto en el presente como en el futuro. De esta forma, en el presente, la principal ventaja presentada consiste en el ahorro energético traducido a unas menores emisiones dañinas al medioambiente, ya que propicia un desarrollo sostenible en consonancia con los distintos convenios internacionales adoptados ante esta problemática. Por otra parte, el radar pasivo permite adelantarse a un posible futuro problema, la saturación del espectro electromagnético, dando la posibilidad de comenzar a dar soluciones ante un problema no tan presente en la actualidad, pero si en el futuro, buscando evitar su aparición.

## ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Así como toda creación del ser humano, los sistemas de detección mediante radar pasivo son creados con un propósito y, es este propósito, el que les permite cumplir una función dentro de la sociedad. En el caso del sistema propuesto durante el desarrollo de este trabajo, su propósito es el de realizar las detecciones y seguimientos necesarios dentro de la ría de Pontevedra, para poder mantener el registro y control del tráfico marítimo en esta zona. De esta forma, se cumple la función para la que ha sido diseñada, observando y siguiendo el tráfico marítimo conformado por mercantes del puerto de Marín, buques pertenecientes a la Escuela Naval Militar, pequeños pesqueros e incluso, embarcaciones de recreo de los puertos deportivos colindantes.

Sin embargo, aunque el propósito de estos sistemas siempre se mantendrá constante (siendo el de realizar las detecciones y seguimientos marítimos), es la función que cumplen dentro de la sociedad, la que se puede escindir de la que fue concebida inicialmente. Así, aunque la creación de un arma dentro de una determinada nación tenga como función, la disuasión del conflicto y la proliferación de la paz, es posible que esa arma tenga que ser empleada en el transcurso de un acto defensivo u ofensivo, negando su función anterior y adquiriendo una diametralmente opuesta.

Este mismo principio es extrapolable a los sistemas de detección pasiva, mientras que su función inicial es el control del tráfico marítimo o aéreo en busca de evitar posibles colisiones o de ayudar en labores de ayuda marítima; estos sistemas, en un futuro, también podrían estar integrados en un sistema de combate de protección costera, por ejemplo. Aquí su propósito de detección se mantendría constante, pero en este caso, su función sería la de aportar datos de posición, rumbo y velocidad de un contacto para que este pueda ser abatido mediante el lanzamiento de un misil con guía a la orden, de tal forma que, el misil navegaría con un navegador inercial hasta la posición predicha e impactaría sobre el contacto.

En este último supuesto, la invención investigación y perfeccionamiento de este sistema, habría estado directamente asociado a la pérdida de vidas humanas, sin embargo, realmente el sistema no ha actuado con conciencia propia y su función inicial no implicaba ningún tipo de daño. De esta explicación, por lo tanto, se puede asumir que sí, en efecto estos sistemas tendrían la capacidad de generar daño en la sociedad, no obstante, es el ser humano el que proporciona una función a sus creaciones y estas deberían ser juzgadas únicamente por su propósito, y no por la función que un determinado tipo de personal le ha dado. Como conclusión, las implicaciones éticas tras esta tecnología dependen enteramente de la humanidad y el uso que esta quiera darle y, de ella depende que estos usos se mantengan en las ventajas que esta tecnología puede aportar, dentro de la buena ética global, como el ahorro energético presentado.

## ANEXO III: CÓDIGO EMPLEADO

El código ha sido diseñado en el entorno de MATLAB para simular el desempeño del método explicado en el punto 3.2.2 en la detección de múltiples contactos, así como su evolución temporal y representación de su geolocalización, siguiendo los principios del punto 3.3. El código será explicado de forma seccionada Y descendente.

```
%Datos Iniciales
clear all;
load('targetLocation_real_radar_135_grados.mat')
c=3235.15;

radar_lat = 42.397763;
radar_lon = -8.706672;
ioo_lat = 42.44465739681575;
ioo_lon = -8.660041334987;
orient_antena=135;
incl_lineabase=54;
W=orient_antena-incl_lineabase;

Rt=6371;
Rte=6378.137;
Rtp=6356.7523142;
```

En esta sección se introducen los datos iniciales como las posiciones geográficas del receptor e IO (en grados), la orientación de la antena, la inclinación de la línea base (en grados) y la diferencia entre estas para el posterior cálculo de  $\theta$ . También se definen las variables de los radios terrestres para la posterior geolocalización.

Por otro lado, también se introduce el valor de “c”, el cual es igual a la mitad de la distancia focal (en metros). Finalmente, en esta sección se realiza la carga de los datos referentes al DOA y distancia biestática, obtenidos por el receptor modo de frecuencia Doppler y analizando el máximo de la ganancia de la señal. Estos datos se encuentran contenidos en los “TargetOutLocation”.

```
%cálculo de coordenadas de las detecciones
%metros existentes en un grado de longitud en la latitud del receptor
e=sqrt((Rte^2-Rtp^2)/Rte^2);
metros_grados=(pi*Rt*cosd(radar_lat)*1000)/(180*sqrt(1-e^2*(sind(radar_lat))^2));
```

En esta parte del código se realizan los cálculos de Ec. (3.21) y Ec. (3.22) del punto 3.3

```
%Determinación de la posición del blanco mediante la intersección de la
%elipse y la recta de la dirección de la señal
flag=0;
figure;
tamanho=size(targetOutLocation);
for CPIs=1:tamanho(2)

    a=(targetOutLocation(CPIs).beam(:,1));
    DOA=targetOutLocation(CPIs).beam(:,3);
    Theta=-DOA+W;
    m=tand(Theta);
    b=sqrt(a.^2-c^2);
    a1=b.^2+a.^2.*m.^2;
    b1=-2*b.^2*c;
    c1=c^2.*b.^2-a.^2.*b.^2;
    n=(-b1+(sign(cosd(Theta)).*sqrt(b1.^2-4.*a1.*c1)))/(2.*a1);
    targetOutLocation(CPIs).beam(:,4)=n./cosd(Theta);
```

Esta sección engloba lo explicado en el punto 3.2.2, se comienza definiendo una “flag” igual a 0 cuyo propósito se observará más adelante. A continuación, se busca y establece dimensión de la matriz “TargetOutLocation”, la cual contiene las distintas tablas donde se encuentran todos los datos de las detecciones para cada CPI (o instante de detección). Por lo tanto, siempre será una matriz de una sola columna y múltiples filas (como se puede observar en la parte de la izq. de la Figura 3-11), el número de filas vendrá determinado por el número de instantes de detección, ya que cada instante o CPI constituye una fila.

Tras esto, se abre un bucle con el comando “for”, con la condición de que se recorra a lo largo de todas las filas de “TargetOutLocation”, es decir, que se recorra para todos los CPIs que contiene. Se asignan valores a “a” la primera columna de valores de cada tabla de cada CPI (son los conocidos como “TargetOutLocation.beam”), esta columna contiene la distancia biestática de la detección. Por otro lado, el DOA será asignado a partir de la tercera columna.

Se crea el ángulo Theta ( $\theta$ ), no obstante se debe resaltar que el DOA aparece en la ecuación como negativo, ya que el radar provee ángulos en negativo si la detección se ha producido a la izquierda de su orientación, y positivos si resulta a la derecha, este criterio de signos es contrario al empleado en la explicación teórica del punto 3.2.2.2, por lo que el DOA debe aparecer en negativo.

Posteriormente se calcula la pendiente de la recta “m”, y se calcula el eje menor de la elipse generada por la distancia biestática “b”. Respectivamente, “a1” “b1” y “c1” hacen referencia a los términos de segundo y primer grado y al término independiente de la Ec. (3.17) del punto 3.2.2.3. “n”, por su parte es la resolución de dicha ecuación, no obstante, lo más llamativo de dicha ecuación es el comando “sign”, este permite obtener una solución u otra de la ecuación de segundo grado, en función del si el coseno de  $\theta$  es positivo o negativo tal y como se explica también en el apartado 3.2.2.3.

Finalmente, se guarda el valor real de la distancia del objetivo al receptor, para cada detección en la cuarta columna de las tablas ya mencionadas anteriormente.

```
% diferencia de longitud (x) y latitud (y) del target con el receptor en
% metros
phi=orient_antena-DOA
x=targetOutLocation(CPIs).beam(:,4).*cosd(phi);
y=targetOutLocation(CPIs).beam(:,4).*sind(phi);

% diferencia de latitudes y longitudes en grados
grados_x=x./metros_grados;
grados_y=y./(1852*60);

%coordenadas target
long_target=grados_x+radar_lon;
lat_target=grados_y+radar_lat;
```

Así pues, siguiendo los pasos del punto 3.3 y calculando phi ( $\Phi$ ), se obtiene la posición geográfica de las detecciones.

```
%pintar ioo,receptor y target
if flag==0 % No pintar mas
geoplot([ioo_lat lat_target(1,1)],[ioo_lon long_target(1,1)],'or-',...
        [lat_target(1,1) radar_lat],[long_target(1,1) radar_lon],'or-',...
        [ioo_lat radar_lat],[ioo_lon radar_lon],'or-')
hold on
geoplot([ioo_lat lat_target(3,1)],[ioo_lon long_target(3,1)],'or-',...
        [lat_target(3,1) radar_lat],[long_target(3,1) radar_lon],'or-',...
        [ioo_lat radar_lat],[ioo_lon radar_lon],'or-')
geoplot([ioo_lat lat_target(5,1)],[ioo_lon long_target(5,1)],'or-',...
        [lat_target(5,1) radar_lat],[long_target(5,1) radar_lon],'or-',...
        [ioo_lat radar_lat],[ioo_lon radar_lon],'or-')
flag=1;
```



```
end
geoscatteer(lat_target,long_target,'*k')
end

geolimits([42.3744 42.4709],[-8.76 -8.57]);
text(radar_lat,radar_lon,'Radar','Color','y');
text(ioo_lat,ioo_lon,'IoO','Color','y');
%text(lat_target,long_target,'TGT','Color','y');
geobasemap satellite
title('Passive Radar Scenario')
```

Ya finalizando el código, se realiza la representación gráfica sobre un mapa satélite de las detecciones, el iluminador de oportunidad y el receptor. Para ello, se abre otro bucle, el cual se realizará solo cuando “flag” esté definido a 0, en este bucle se realizará la representación gráfica del triángulo formado por la detección, el receptor y el IO. Debido a las múltiples detecciones de un mismo contacto en un mismo instante de tiempo (problema que ya se comentó con anterioridad en el punto 3.2.1), únicamente se repetirá una vez por cada contacto, con intención de evitar la saturación de la imagen.

Por último, se establecen los límites de la representación entorno a la ría de Pontevedra, la zona del experimento.

## ANEXO IV: MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE BLANCOS

Este anexo trata de explicar un método alternativo para la determinación de blancos, tal y como se hizo en el punto 3.2.2.3 con el método principal. Es importante destacar que, ambos métodos son igualmente válidos y no existe ninguna diferencia funcional entre ellos, simplemente, el método alternativo fue descubierto con posterioridad, para ese momento, se habían realizado múltiples pruebas con el principal.

Para realizar la explicación de este método, primero supondremos un escenario genérico para realizar el trabajo:

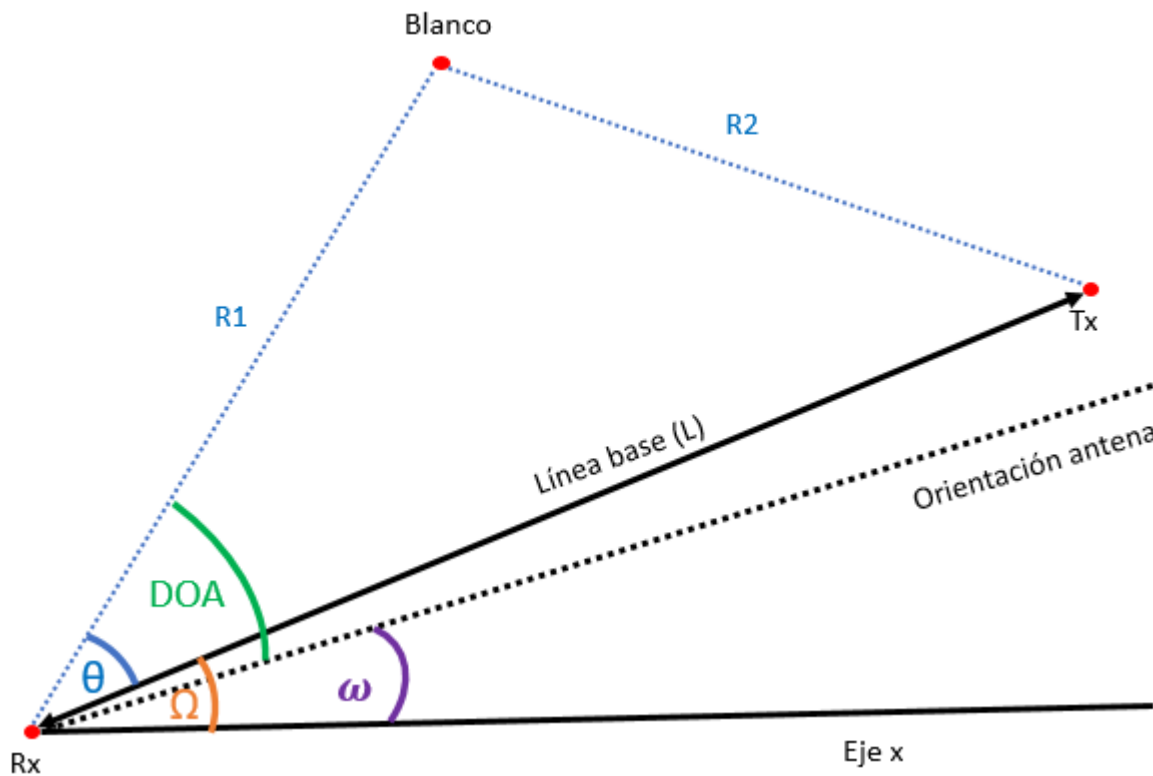


Figura A4-0-1 Situación genérica con inclinación de línea base y orientación de antena [AP]

Del escenario presentado en la Figura A4-1, es necesario saber que se conocen la distancia de la línea base ( $L$ ), la orientación de la antena (es decir, el ángulo  $\omega$ ), el DOA (proporcionado por el radar) y la inclinación de la línea base ( $\Omega$ ).  $R_1$  y  $R_2$  son las distancias del blanco al Rx y Tx respectivamente. Este método se centra en el uso del teorema del coseno mediante el cual se establece:

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_1^2 + L^2 - R_2^2}{2 * R_1 * L}\right) \quad (A4. 1)$$

Despejando Ec. (A4. 27) se obtiene:

$$2 * R_1 * L * \cos(\theta) = R_1^2 + L - R_2^2 \quad (A4. 2)$$

Además se sabe que la distancia biestática ( $R_{bist}$ ) es la suma de  $R_1 + R_2$ , por lo que:

$$R_2 = R_{bist} + R_1 \quad (A4. 3)$$

Por lo tanto, sustituyendo la Ec. (A4.29) en la Ec. (A4.28) se obtiene:

$$2 * R_1 * L * \cos(\theta) = R_1^2 + L^2 - (R_{bist} - R_1)^2 \quad (A4.30)$$

Teniendo Ec. (A4.30), conocemos todos los parámetros a excepción de  $\theta$  y  $R_1$ , esta última es la distancia del blanco al receptor y es la incógnita que se está buscando. Por lo que despejando  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{R_{bist}^2 - L^2}{2 * (R_{bist} - L * \cos(\theta))} \quad (A4.4)$$

Finalmente, por composición de ángulos de figura del esquema genérico:

$$\theta = \omega - \Omega - DOA \quad (A4.5)$$

Gracias a la Ec. (A4.32), ya se conocen todos los términos de la Ec. (A4.31) y se puede obtener la distancia del blanco al receptor al receptor.

Tras la realización de este paso, los pasos posteriores son homólogos al proceso principal.

El código empleado para este método es idéntico que el anteriormente explicado. La diferencia radica en el método de determinación de la posición el cual queda de la siguiente forma:

```
tamanho=size(targetOutLocation);
for CPIs=1:tamanho(2)
    R=targetOutLocation(CPIs).beam(:,1)*2;
    Theta=w-omega-targetOutLocation(CPIs).beam(:,3);

    targetOutLocation(CPIs).beam(:,4)=(R.^2-L.^2)./(2.*(R-L.*cosd(Theta)))
```

Aquí, el bucle del “for” vuelve a recorrer la matriz entera del “TargetOutLocation” donde residen los datos obtenidos por el receptor del radar pasivo (el rango biestático y el DOA). En el bucle se calcula mediante la Ec. (A4.31), obteniendo la distancia  $R_1$  para cada detección y, se guarda en la columna 4 de “TargetOutLocation.beam”, tal y como se hacía en el otro método.

El resto de la geolocalización de la posición y su representación en el mapa satelital, se realiza de forma análoga al otro método. Este método ha sido expuesto a los mismos escenarios que el otro método, obteniendo los mismos resultados

Como conclusión, esta forma, supone un menor coste computacional y destaca por su mayor simplicidad, sin embargo, se ha elegido explicar el otro dentro de la parte de desarrollo del TFG, ya que contiene una afinidad más explícita de la geometría biestática y facilita la comprensión de estos conceptos.

## ANEXO V: DATOS DE LA SIMULACIÓN FINAL

A fin de tratar el trabajo con una mayor rigurosidad, se considera de interés presentar los datos obtenidos en la simulación de las detecciones del radar, referentes al escenario final del 3.4.2 por ser el más importante y el definitivo. En este escenario se producen 6 detecciones por cada CPI (es decir, 2 detecciones por blanco) con un total de 125 CPIs obtenidos. Por este motivo, y considerándose que la representación de los 125 CPIs sería demasiado engorrosa, se representará únicamente las detecciones de un CPI por cada 10, con la intención de poder observar los cambios en las detecciones del blanco número 3, el cual es el único blanco dinámico en movimiento. De esta forma se representarán 14 CPIs, siendo el último salto de 5 CPIs.

Cabe destacar que, en los datos mostrados a continuación, los blancos 1 y 2 no variarán sus parámetros puesto que son estáticos, por el contrario, el blanco 3 si lo hará. En los datos apenas se apreciará un cambio significativo del DOA, esto se debe a que el rumbo que lleva el contacto (SE), es un rumbo muy cercano al que se dirige hacia el propio receptor.

| CPI-1    |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4600                 | 128,90625          | -2      |
|          | 4612,5               | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-1 Datos CPI-1**

| CPI-10   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4587,50              | 128,90625          | -2      |
|          | 4600                 | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-2 Datos CPI-10**

| CPI-20   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4587,5               | 128,90625          | -2      |
|          | 4550                 | 140,625            | -2      |

**Tabla A5-3 Datos CPI-20**

| CPI-30   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4550                 | 140,625            | -2      |
|          | 4562,5               | 140,625            | -2      |

**Tabla A5-4 Datos CPI-30**

| CPI-40   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4537,5               | 140,625            | -2      |
|          | 4550                 | 140,625            | -2      |

**Tabla A5-5 Datos CPI-40**

| CPI-50   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4512,5               | 128,90625          | -3      |
|          | 4525                 | 128,90625          | -3      |

**Tabla A5-6 Datos CPI-50**

| CPI-60   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4512,5               | 128,90625          | -2      |
|          | 4525                 | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-7 Datos CPI-60**

| CPI-70   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4487,5               | 128,90625          | -2      |
|          | 4500                 | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-8 Datos CPI-70**

| CPI-80   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4500                 | 117,1875           | -2      |
|          | 4475                 | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-9 Datos CPI-80**

| CPI-90   |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4487,5               | 117,1875           | -2      |
|          | 4450                 | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-10 Datos CPI-90**

| CPI-100  |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4475                 | 117,1875           | -2      |
|          | 4437,5               | 128,90625          | -2      |

**Tabla A5-11 Datos CPI-100**

| CPI-110  |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4450                 | 117,1875           | -2      |
|          | 4462,5               | 117,1875           | -2      |

**Tabla A5-12 Datos CPI-110**

| CPI-120  |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4437,5               | 117,1875           | -2      |
|          | 4450                 | 117,1875           | -3      |

**Tabla A5-13 Datos CPI-120**

| CPI-125  |                      |                    |         |
|----------|----------------------|--------------------|---------|
|          | Dist. biestática (m) | Frec. Doppler (Hz) | DOA (°) |
| Blanco 1 | 3700                 | 0                  | 10      |
|          | 3712,5               | 0                  | 10      |
| Blanco 2 | 5050                 | 0                  | -30     |
|          | 5062,5               | 0                  | -30     |
| Blanco 3 | 4425                 | 117,1875           | -2      |
|          | 4437,5               | 117,1875           | -2      |

**Tabla A5-14 Datos CPI-125**



## ANEXO VI: FUNCIÓN DE AMBIGÜEDAD Y PROCESAMIENTO CFAR

A pesar de que no es el objetivo del trabajo, las simulaciones de las detecciones han supuesto una parte fundamental del trabajo sin la cual no se podrían haber realizado los distintos escenarios para corroborar la eficiencia del código. Por ello, en este apartado, se muestran los resultados visuales del procesamiento de las señales llegadas al radar. En primer lugar, se representan, los resultados de la función de ambigüedad (mencionada en el punto 2.5.1), en 2 dimensiones. En segundo lugar, se muestran las imágenes del procesamiento CFAR de los productos obtenidos por la función de ambigüedad, este procesamiento, es el que determina si existe el blanco asociado a la detección.

Las imágenes mostradas son las asociadas a las detecciones del Anexo V, con un total de 14 CPIs. Los dos blancos que carecen de Doppler, están asociados a los blancos 1 y 2, el que si lo tiene es el 3, debido a su velocidad. Al mantener una velocidad prácticamente constante, manteniendo un rumbo hacia el receptor y, debido al poco tiempo transcurrido entre el CP1-1 y el 125, el Doppler no variará demasiado. Sin embargo, se puede dar el caso en el que un barco cambie de estar en acercamiento, a estar en alejamiento, en este caso el Doppler cambiaría de signo e incluso llegaría ser 0 sin estar estático.

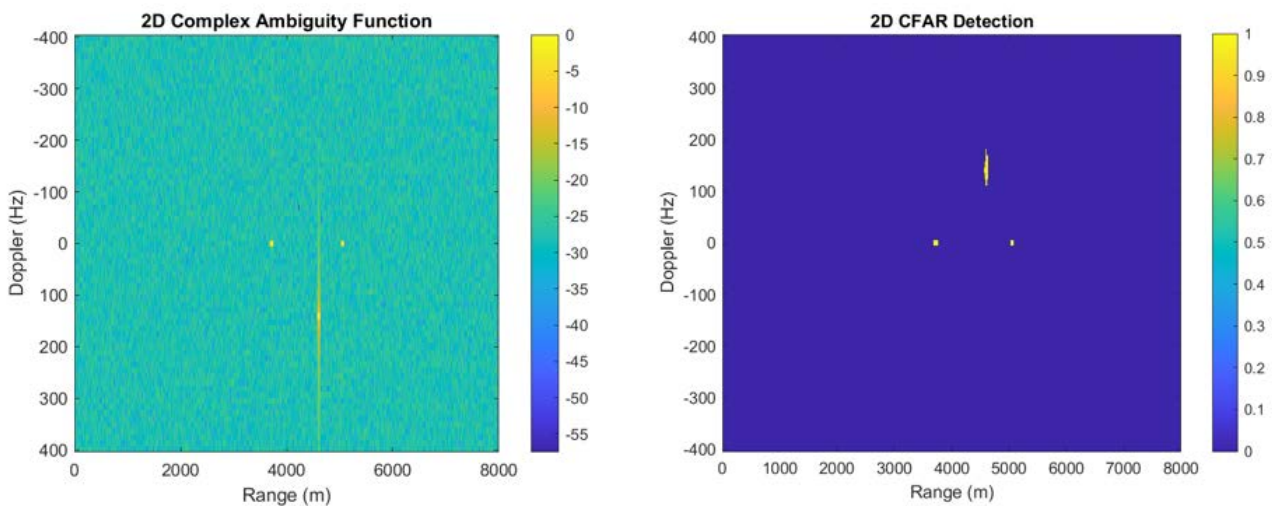


Figura A6-0-1 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-1 [AP]

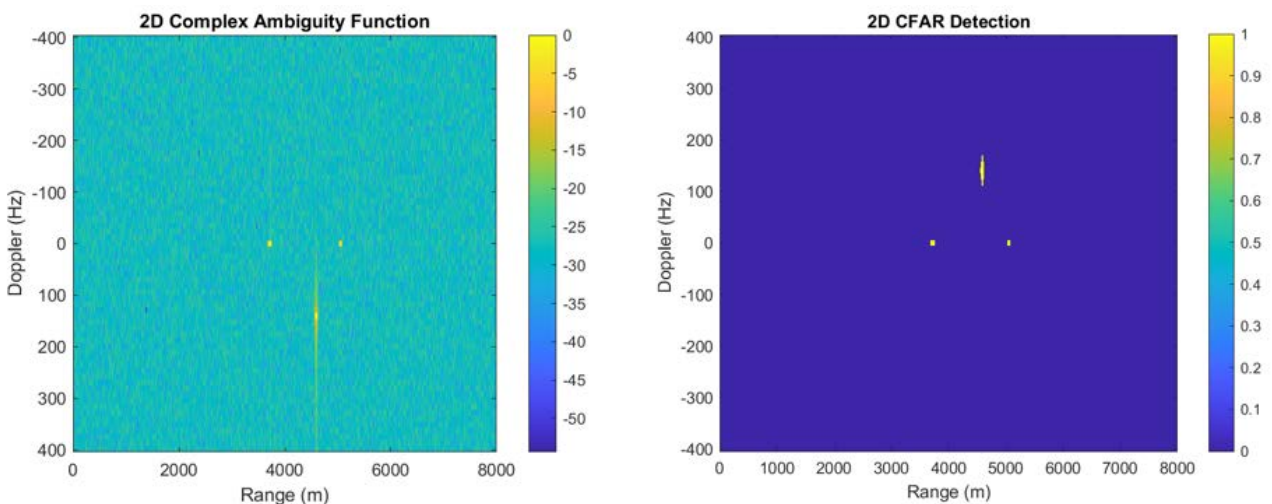


Figura A6-0-2 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-10 [AP]

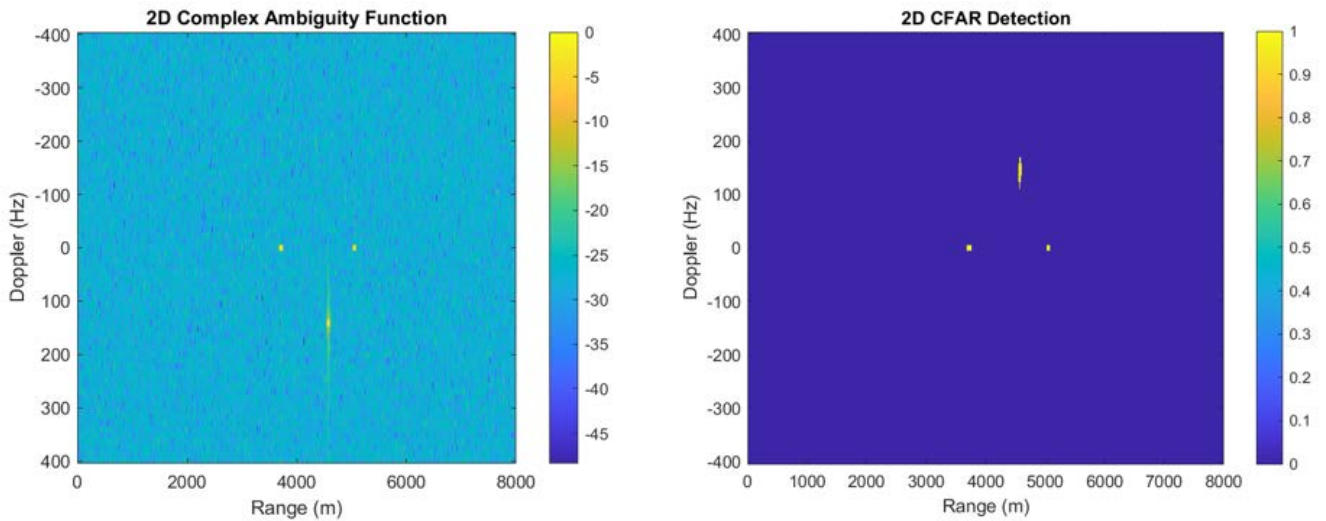


Figura A6-0-3 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-20 [AP]

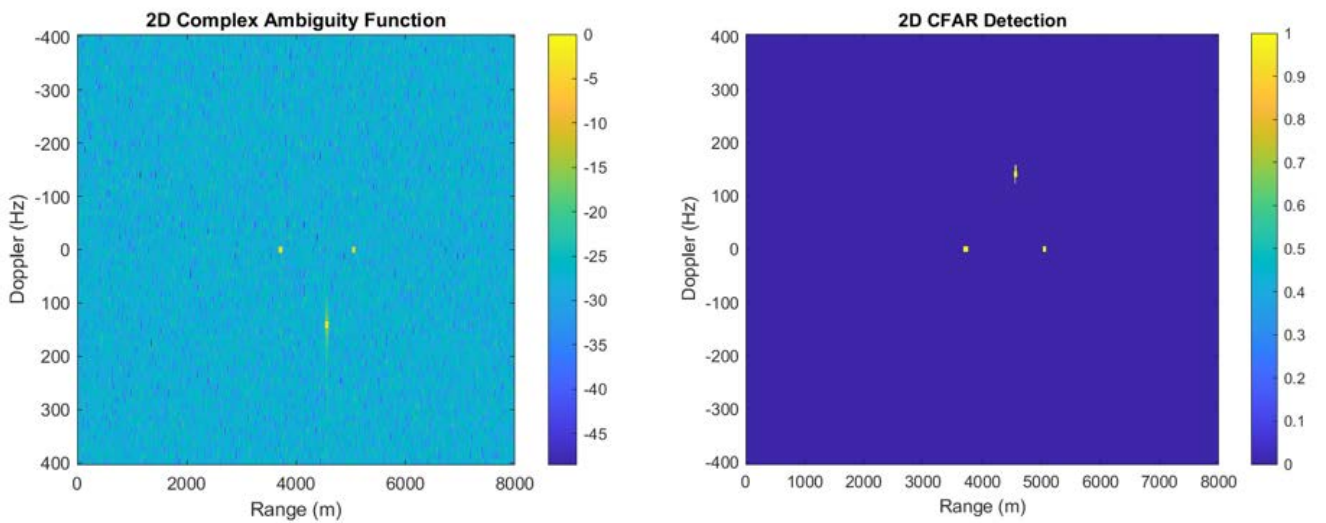


Figura A6-0-4 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-30 [AP]

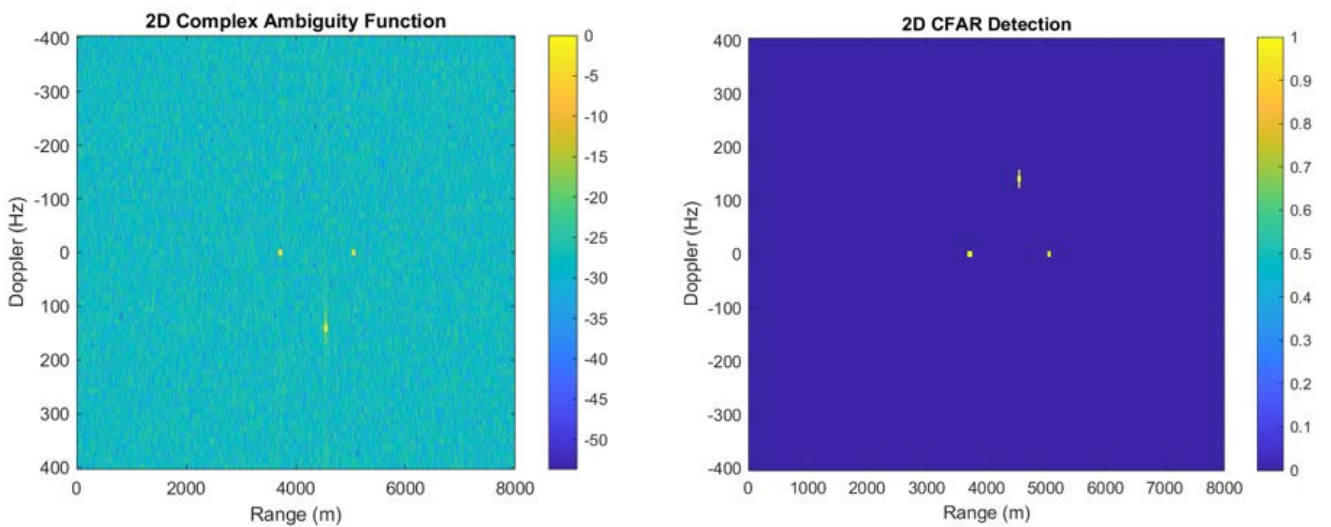


Figura A6-0-5 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-40 [AP]

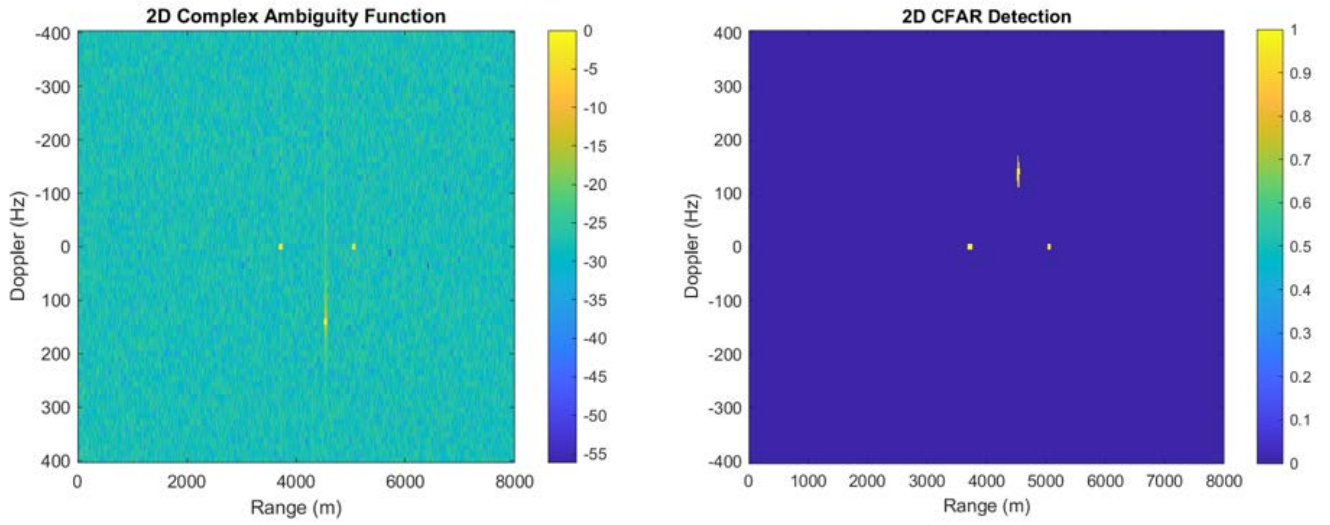


Figura A6-0-6 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-50 [AP]

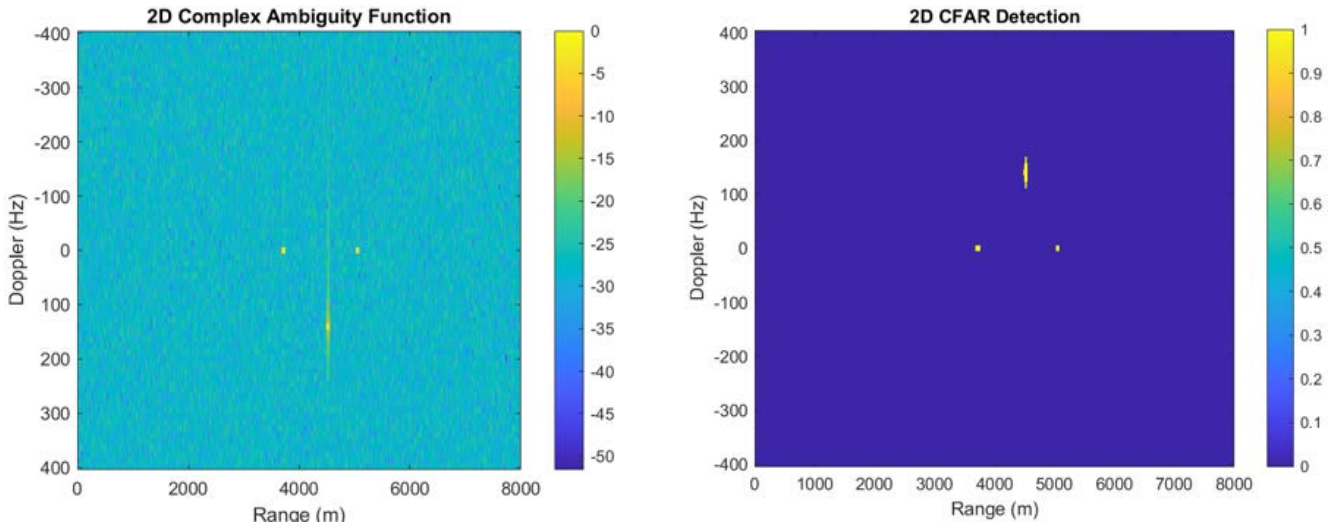


Figura A6-0-7 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-60 [AP]

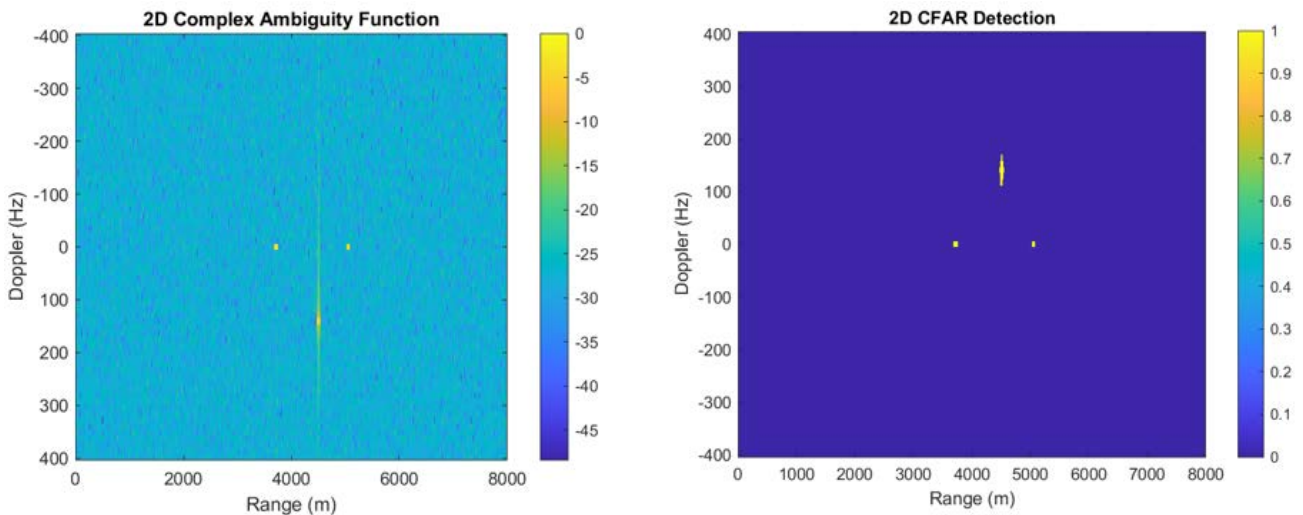


Figura A6-0-8 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-70 [AP]

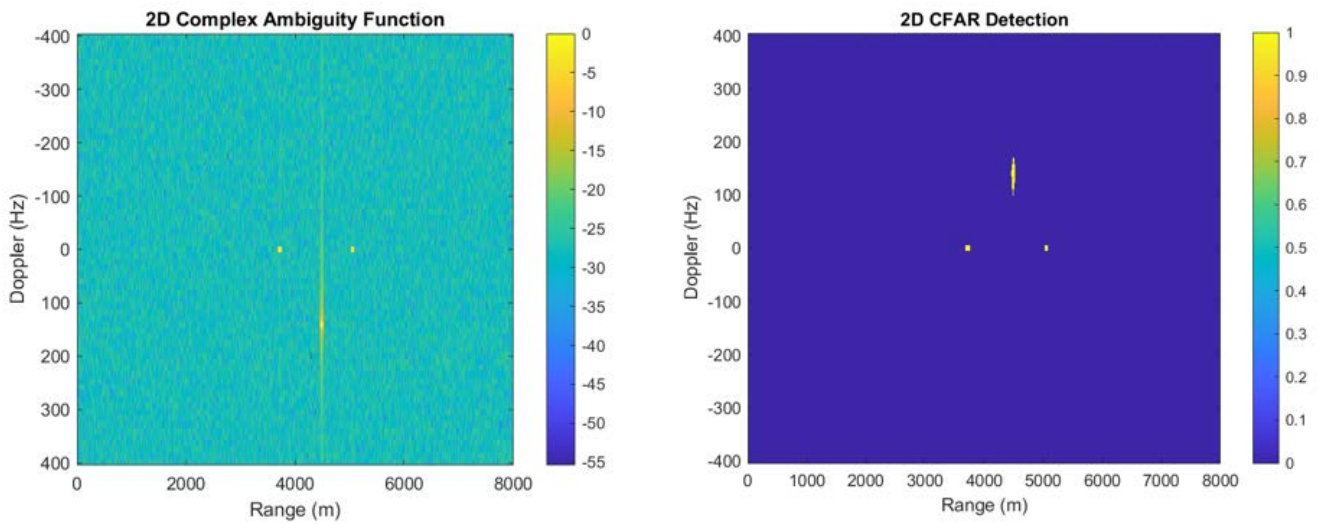


Figura A6-0-9 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-80 [AP]

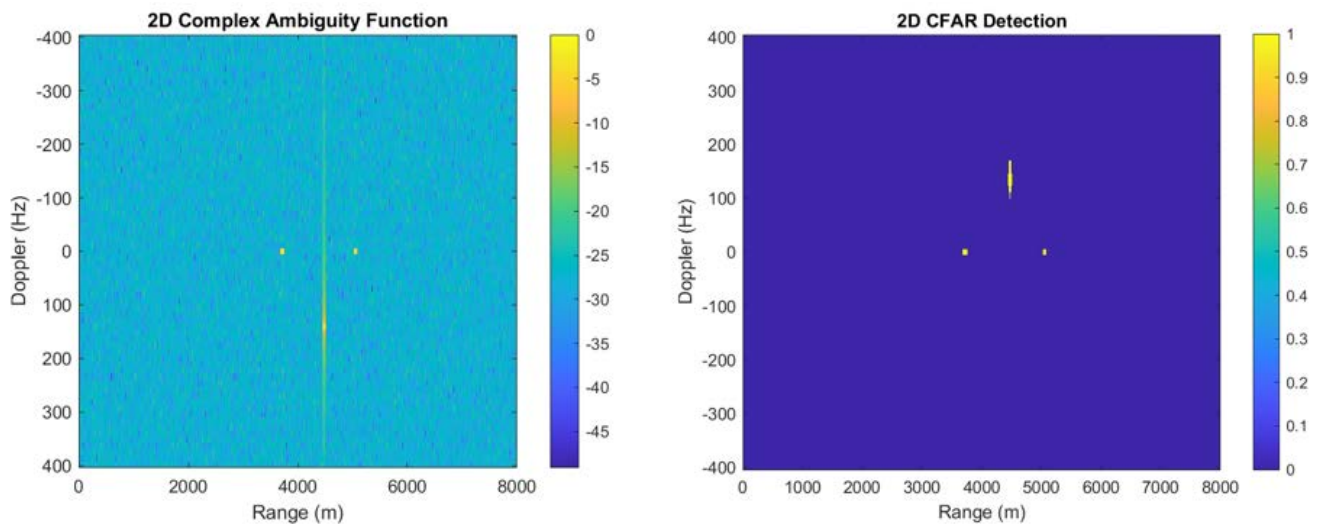


Figura A6-0-10 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-90 [AP]

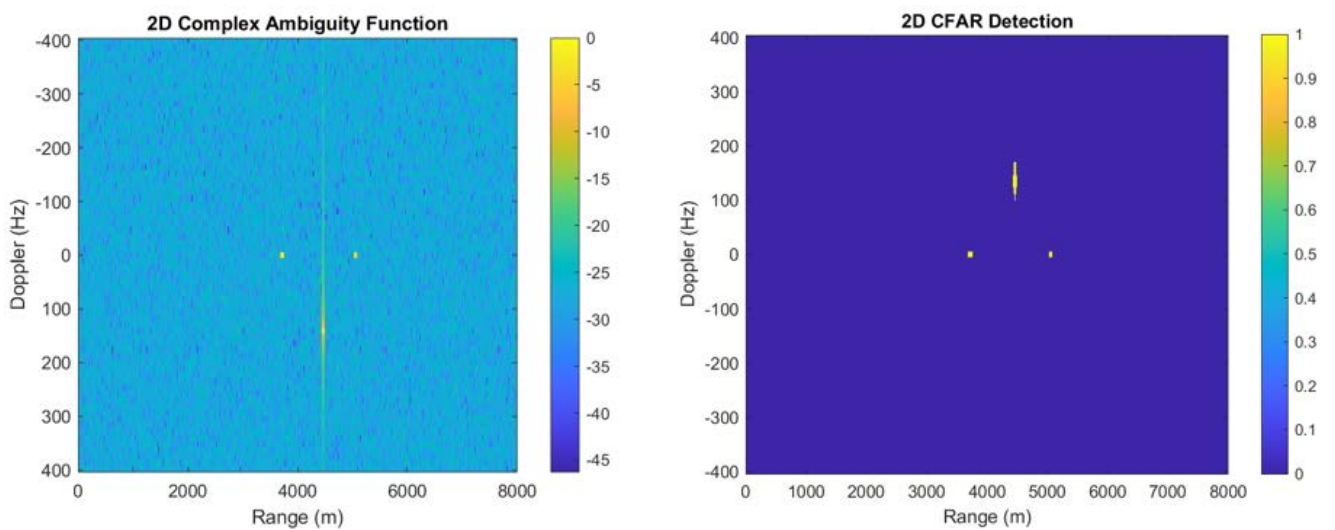


Figura A6-0-11 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-100 [AP]

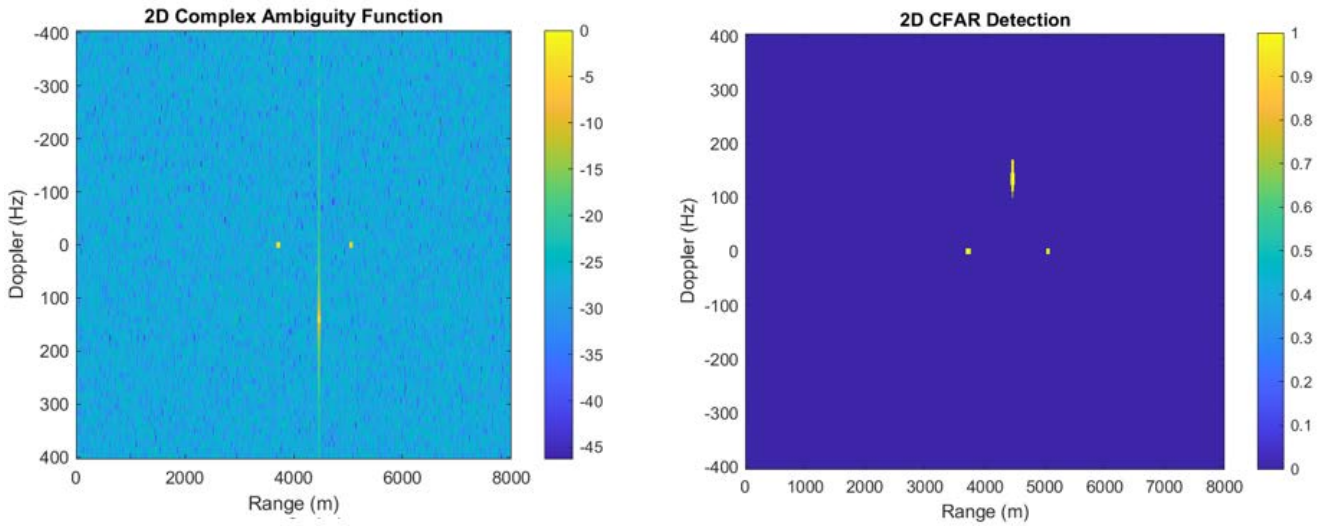


Figura A6-0-12 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-110 [AP]

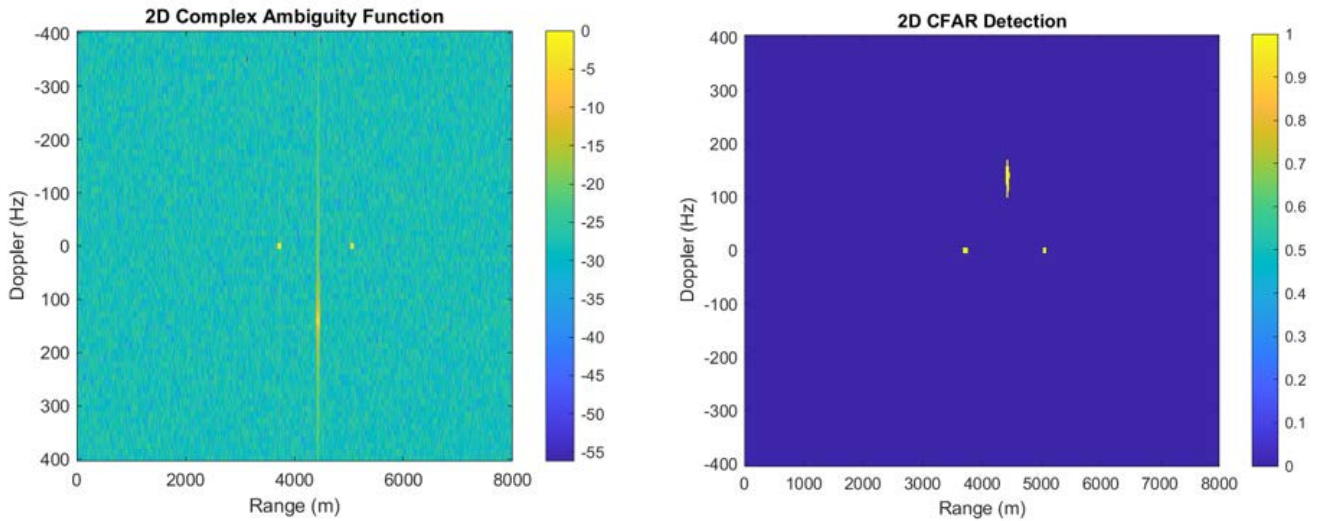


Figura A6-0-13 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-120 [AP]

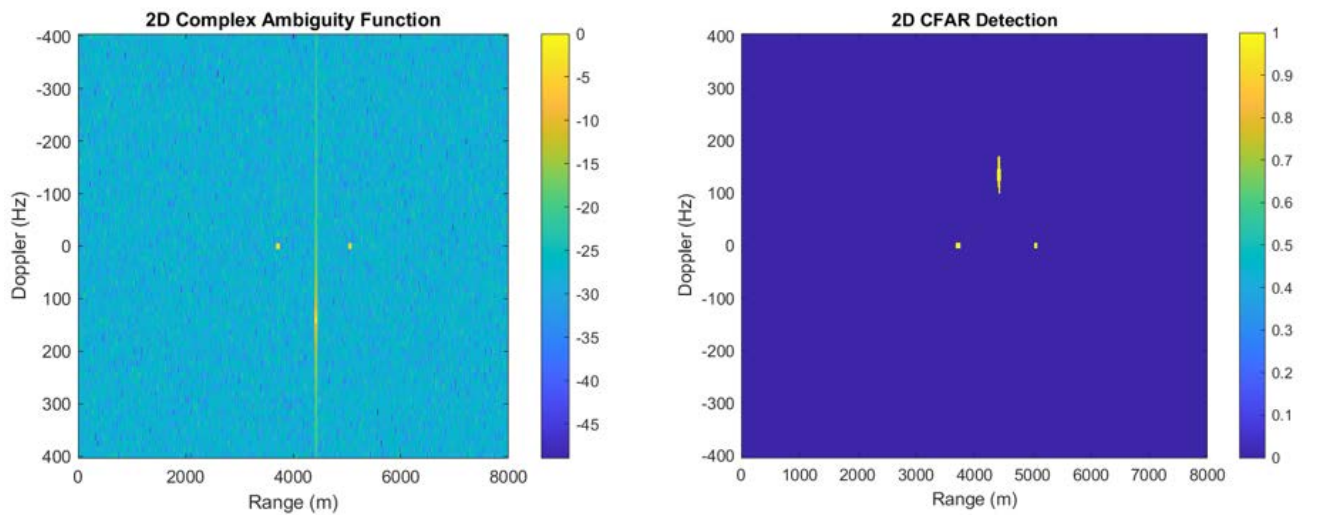


Figura A6-0-14 Función de ambigüedad y procesamiento CFAR CPI-125 [AP]

## ANEXO VII: REPRESENTACIÓN SOBRE OPENCPN

Más allá de los objetivos establecidos para este trabajo, además de realizar la representación de los blancos sobre mapas satélite, se ha buscado realizar la representación de dichos blancos sobre el software de navegación OpenCPN. Este, es un software libre por lo que no es medio oficial y homologado para la navegación, no obstante, en la realidad, este medio es ampliamente utilizado a lo largo del mundo como apoyo a la navegación por su utilidad y comodidad.

La elección del OpenCPN para la representación de los blancos se debe a que, con este software, es posible realizar una sincronización con la información AIS (Automatic Identification System) que todo buque está obligado a transmitir. De esta forma, se puede realizar una rápida comprobación de la eficiencia del sistema radar en la detección y determinación de blancos, comparando las posiciones representadas a partir de las detecciones radar con las que están transmitiendo los buques en cuestión.

La representación sobre este programa, se realiza a partir de las coordenadas geográficas calculadas en el punto 3.3. Una vez calculadas las coordenadas de cada contacto para intervalo de tiempo mediante MATLAB, se establece una conexión TCP entre los dos programas para poder enviar los datos de las posiciones desde un software al otro. Esta información, se debe enviar en unos formatos determinados, con el objetivo de que el receptor de la información, la pueda entender y procesar. Estos formatos son los establecidos por la organización NMEA (National Marine Electronics Association), el cual se constituye como el organismo que establece los estándares de comunicación en la electrónica del mundo marino.

Existen numerosos formatos para enviar la información al OpenCPN, sin embargo, en el desarrollo de este trabajo utilizaremos el NMEA-0183: GLL. Este formato es ampliamente utilizado en los sistemas de posicionamiento e información GPS y se compone de la siguiente forma:

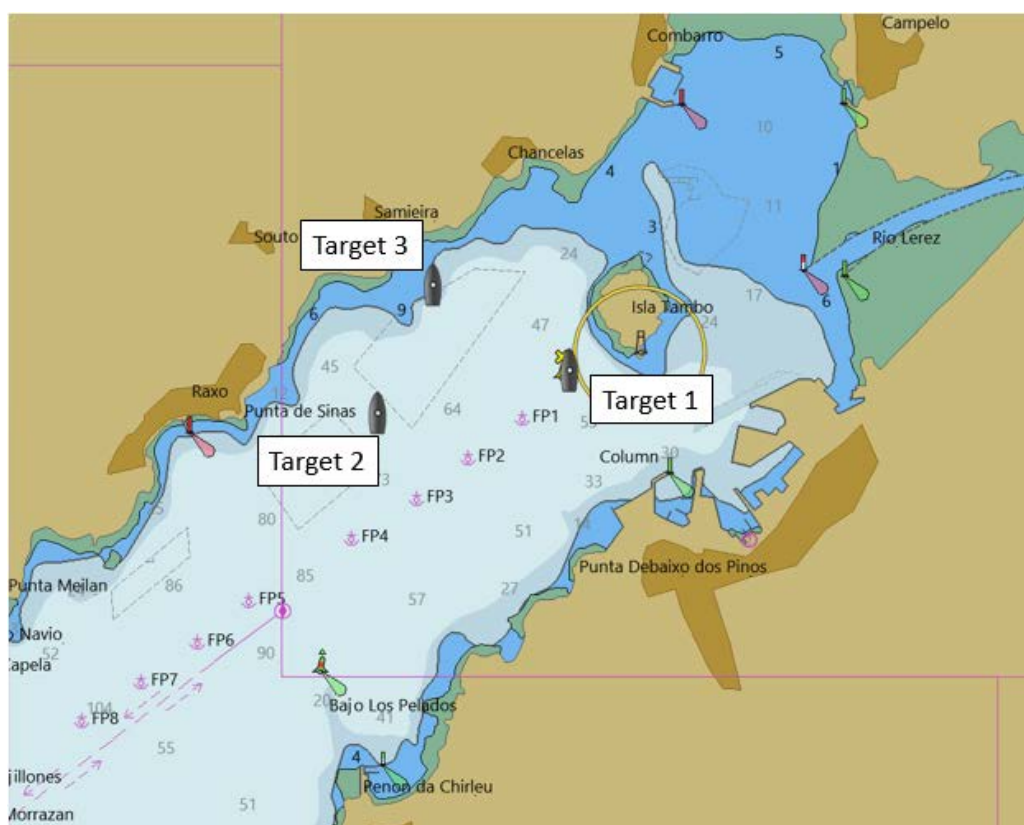
\$GPGLL,llll.ll,N,yyyy.yy,E,hhmmss.ss,A\*hh

- La primera parte está constituida por “\$GPGLL”, esta parte constituye la cabecera de la sentencia, identificándola como una sentencia NMEA tipo GLL. El símbolo “\$” siempre marca el comienzo de la sentencia.
- La segunda parte (“llll.ll”), consiste en la coordenada de la latitud, la cual siempre deberá encontrarse en la forma ddmm.mmm, es decir, los dos primeros caracteres son los grados, y los dos siguientes son los minutos, pudiendo tener hasta 7 decimales de minuto.
- La tercera parte, varía entre norte (N) y sur (S), dependiendo del hemisferio de la detección.
- La cuarta (yyyy.yy), es la referente a la longitud geográfica. Siendo la secuencia en este caso dddmm.mm, con los tres primeros caracteres asociados a los grados, y los dos siguientes a los minutos (con hasta 7 decimales).
- La “E” hace referencia, de nuevo, a si la detección es en una coordenada este (E) u oeste (W).
- El formato “hhmmss.ss”, coincide con la hora UTC de la creación del mensaje en horas, minutos y segundos tal y como se muestra en el ejemplo.
- Finalmente, la “A”, es un indicador de estado, mediante el cual se identifica si el dato es válido (A), o no (V)
- Por último, se encuentra el (\*hh), en primer lugar, “\*” marca el final de la sentencia (así como lo iniciaba el símbolo "\$") y, en segundo lugar, hh es el checksum. Este campo muestra una suma de comprobación que se utiliza para verifica la integridad del mensaje. La suma se realiza con los valores ASCII entre “\$” y “\*”, dividiendo entre 256 y tomando el resto en hexadecimal.

Cabe destacar que en este trabajo, las detecciones siempre se realizarán en la ría de Pontevedra, por lo que se puede asumir como constante los caracteres “N” y “W”.

Para la representación sobre OpenCPN, se han utilizado los datos de las simulaciones del escenario final, explicado en el punto 3.4.2. No obstante, tras múltiples pruebas, se ha observado que el formato empleado para transmitir la información, permite a OpenCPN recibir e interpretar las posiciones, sin embargo, lo interpreta como si cada posición que recibiese, se tratase del mismo barco sobre el que se encuentra navegando el programa. Es decir, que el programa interpreta que estas posiciones le están llegando del sistema de navegación del propio buque en el que se encuentra. Esto, tiene varias implicaciones, la primera es que resulta imposible representar varios blancos a la vez mediante este sistema ya que, cuando recibe una posición, la representa correctamente sobre la cartografía, pero al llegarle otra posición, el sistema entiende que el propio barco se ha desplazado y se encuentra en esa nueva posición, borrando la anterior y representando la nueva. La segunda consecuencia deriva de la primera, pues resulta imposible llevar un registro del movimiento de un contacto al borrar su posición anterior.

Sin embargo, la representación se ha realizado de forma exitosa, tal y como muestra la figura inferior, la cual es el resultado de las imágenes de cada detección por separado editado sobre la misma imagen.



**Figura A7-0-1 Representación OpenCPN del primer intervalo de detecciones [AP]**

En futuras ocasiones, para poder solucionar esta limitante, se considera adecuado un formato de transmisión de información similar al que posee el sistema AIS para realizar su conexión. De esta forma, se podrán realizar representaciones de múltiples blancos al mismo tiempo y, realizar seguimiento de sus posiciones pasadas. Esto se debe a que, al simularse ser la señal AIS de otro buque, el sistema sí interpretará que se trata de otro contacto y no de él mismo.

A pesar de esto, los satisfactorios resultados en la realización de la conexión TCP entre programas y del posicionamiento correcto de los blancos, supone un gran avance en el estudio de esta tecnología, abriendo las puertas a una gran forma de corroboración de eficiencia del sistema pasivo.

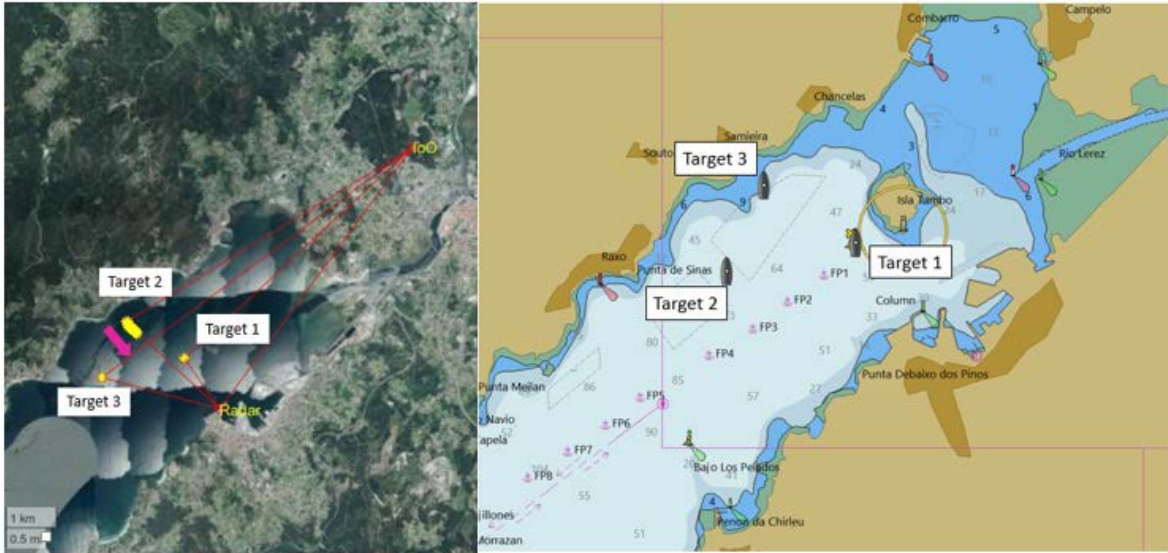


Figura A7-0-2 Corroboración del posicionamiento de los blancos en OpenCPN [AP]

Respecto a la evolución del escenario, se puede observar el movimiento realizado por el blanco 3 (en su rumbo sureste) conforme a lo establecido en el escenario final.

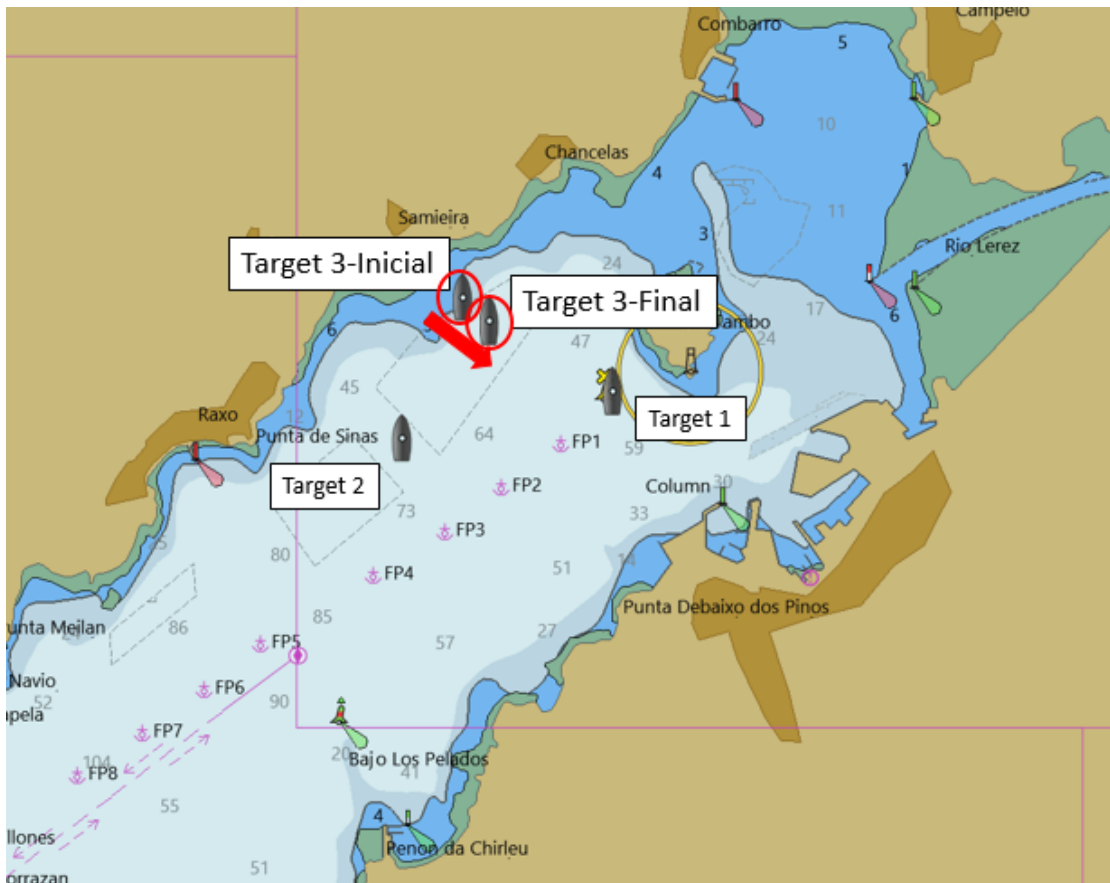


Figura A7-0-3 Evolución espacio-temporal del Target 3 en OpenCPN [AP]

En lo referente al código empleado, cabe destacar que este se integra con el código explicado en el Anexo III, de tal forma que se aloja entre las zonas de la determinación de las coordenadas geográficas de los blancos y de la representación gráfica sobre el mapa satélite. Por ello, se encuentra en el bucle que recorre todas las detecciones realizadas a través los intervalos de detección. El código es el siguiente:



```
data_mask1 = '$GPGLL,';
data_mask2 = 'A,*';
address = '127.0.0.1';
port = 2947;
t = tcpclient(address,port);
```

El código comienza estableciendo las máscaras del inicio (donde se encuentra la cabecera) y del final (donde posteriormente se alojará el checksum del código). Aquí, se produce la apertura de la conexión TCP entre ambos programas mediante el comando “tcpclient” y el puerto 2947 y la IP de local host 127.0.0.1.

```
hora_actual = clock;
hora = hora_actual(4); % Extraer solo la hora
minutos = hora_actual(5); % Extraer solo los minutos
segundos = hora_actual(6); % Extraer solo los segundos

if hora<10
    hora_string=strcat('0',num2str(hora));
else
    hora_string=num2str(hora);
end
if minutos<10
    minutos_string=strcat('0',num2str(minutos));
else
    minutos_string=num2str(minutos);
end
if segundos<10
    segundos_string=strcat('0',num2str(segundos,4));
else
    segundos_string=strcat(num2str(segundos,5));
end
hora_cad=strcat(hora_string,minutos_string,segundos_string);
```

En este apartado se realizan las operaciones necesarias para la extracción de la hora. Con el comando “clock” se obtiene una matriz donde se encuentra el año, mes, día, hora, minuto y segundo, por ello es necesario extraer de la matriz los valores requeridos. Cabe destacar que el formato GLL, no permite tener una sola cifra en las horas, minutos o segundos, por ello, en caso de que alguna de estas cifras sea menos que 10, deberá asignarse un 0 a su izquierda. Finalmente se crea el formato requerido de la hora en “hora\_cad”.

```
lat_num=degrees2dm(lat_target(5));
lat_string=strcat(num2str(round(lat_num(1))),num2str(lat_num(2),4))
long_num=degrees2dm(abs(long_target(5)));
long_string=strcat('00',num2str(round(long_num(1))),num2str(long_num(2),4));
data=strcat(data_mask1,num2str(lat_string),'N',num2str(long_string),'W',' ',hor
a_cad,',',data_mask2);
```

Las cuatro primeras líneas de código realizan la transformación de las coordenadas geográficas en el formato requerido. Primero se separan las coordenadas en grados y minutos, tras esto se juntan ambas unidades buscando el dato hasta el segundo decimal. En todas las detecciones, la longitud tendrá un valor de 8°, al tratarse de una sola unidad, es necesario añadir 2 ceros a su izquierda para ajustarse al formato. Debido a las limitaciones de la sentencia GLL de no poder pintar varios blancos, se debe seleccionar el contacto que se quiera representar (en este caso la posición 5 de la matriz de la longitud y latitud, corresponde al target 3). Finalmente, se forma la sentencia sobre la que se realizará el checksum con el nombre de “data”.

```
CHECKSUM5
data=strcat(data,checksum)
writeline(t,data);

clear t
```

Por último, se llama a la función “CHECKSUM5” la cual empleará como dato de entrada “data” y sobre la que realizará el checksum. Tras esto, se introduce este cálculo en “data” y se envía al OpenCPN mediante el comando “write”.