



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE **UPV** INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN PARA VIGILANCIA AÉREA EN TMA.

Vicente Moreno Quintana

Tutor: Juan Vicente Balbastre Tejedor

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2016-17

Valencia, 1 de septiembre de 2017

Resumen

El Proyecto actual se basa en el desarrollo de un simulador de sistemas de multilateración hecho con matlab, para cubrir el área de un aeropuerto y sus rutas de aproximación, cuya función es obtener resultados de la capacidad que puede proporcionar cualquier sistema de multilateración, con la finalidad de estudiar los parámetros del sistema y caracterizarlos para obtener un mayor rendimiento y precisión. Un Sistema de multilateración con mayor capacidad podrá realizar posicionamientos de aeronaves con mayor precisión y así los controladores aéreos podrán gestionar más eficientemente el tráfico de aviones en las inmediaciones de dicho aeropuerto.

En este programa se han empleado los algoritmos de Schau y Schmidt para detectar la posición de las aeronaves en su trayecto mediante la multilateración y posteriormente estos resultados han sido filtrados utilizando el filtro de Kalman. También se ha utilizado un método estadístico conocido como límite inferior de Cramér-Rao, para estudiar la capacidad de precisión del sistema en el área de cobertura.

El simulador utiliza una interfaz gráfica para la introducción de datos y visualización de resultados; también hace uso de funciones programadas para poder calcular estos resultados para su estudio posterior.

En el trabajo se estudiarán diversos escenarios de aeropuertos con diferentes terrenos para evaluar cada uno de los parámetros utilizados, con la finalidad de determinar la precisión del posicionamiento y la cobertura que puede proporcionar dicho aeropuerto en el espacio aéreo seleccionado.

Palabras clave: Sistema de multilateración, posicionamiento, precisión, cobertura, algoritmos, parámetros.

Abstract

The current Project is based on the development of a simulator of multilateration systems made with matlab, to cover the area of an airport and its approach routes, whose function is to obtain results of the capacity that can be provided by any multilateration system, with the purpose of studying the system parameters and characterizing them to obtain a greater capacity and precision. A multilateration system with greater capacity will be able to perform aircraft positions with greater precision and thus the air controllers will be able to manage more efficiently the traffic of airplanes in the vicinity of this airport.

In this program the Schau and Schmidt algorithms have been used to detect the position of the aircraft in their path through the multilateration and later these results have been filtered using the Kalman filter. A statistical method known as the lower limit of Cramér-Rao has also been used to study the accuracy of the system in the coverage area.

The simulator uses a graphical interface for data entry and visualization of results, it also uses functions programmed to be able to calculate these results for later study.

The work will study different airport scenarios with different terrains to evaluate each of the parameters used, with the goal to determine the positioning accuracy and the coverage that can provide that airport in the selected airspace.

Key words: Multilateration system, positioning, precision, coverage, algorithms, parameters.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Necesidad de los sistemas de multilateración para vigilancia aérea.....	8
2. VIGILANCIA ATM.....	11
2.1. Introducción al ATM	11
2.2. Sistemas de Vigilancia ATM	11
2.2.1 Sistemas de Vigilancia Independientes	12
2.2.2 Sistemas de Vigilancia Dependientes	15
3. SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN	18
3.1 Funcionamiento.....	18
3.2 Medición y estimación del TDOA.	21
3.2.1 A partir del TOA de cada señal.	21
3.3 Cálculo de la posición.	22
3.3.1 Posicionamiento 3D.....	23
3.3.2 Posicionamiento 2D.....	24
3.4 Componentes del Sistema.....	25
3.4.1 Equipamiento de la aeronave.	25
3.4.2 Equipamiento en tierra.....	26
3.5 Ventajas de la multilateración frente a otros sistemas.	30
4. ESTUDIO DE PRECISIÓN Y RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN.	32
4.1. Parámetros de rendimiento	32
4.1.1 CRLB.....	32
4.1.2 Número de Iteraciones de MonteCarlo	35
4.2. Tracking.....	36
4.2.1 Algoritmos de seguimiento utilizados	36
4.2.2 Filtro de Kalman.....	37

5. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	40
5.1. Introducción de datos	41
5.1.1 Introducción Área.....	41
5.1.2 Introducción parámetros de las estaciones	41
5.1.3 Introducción trayectorias de las aeronaves.....	41
5.1.4 Introducción propiedades de la transmisión.....	41
5.2. Realización de cálculos y estudio.....	42
5.2.1 Estudio por trayecto.....	42
5.2.1.1 Cálculo de la visibilidad radioeléctrica de las estaciones.....	42
5.2.1.2 Cálculo de la CRLB.....	42
5.2.1.3 Cálculo de trayectos con los algoritmos.....	42
5.2.1.4 Filtrado de resultados.....	43
5.2.1.5 Visualización de resultados.....	43
5.2.2 Estudio por área.....	45
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	47
6.1 Introducción a los análisis y resultados.....	47
6.2 Estudio de las propiedades.....	48
6.2.1 Estudio del parámetro altura del mástil.....	48
6.2.2 Estudio del error instrumental en el receptor.....	51
6.2.3 Estudio de los parámetros que afectan al nivel de señal recibida.....	53
6.2.4 Estudio de la geometría de las estaciones.....	56
6.2.4.1 Configuraciones de cuatro y cinco estaciones en terreno plano.....	57
6.2.4.2 Configuraciones de cuatro y cinco estaciones en terreno montañoso.....	58
6.3 Estudio de los algoritmos utilizados.....	61
6.3.1 Análisis del primer trayecto.....	62
6.3.2 Análisis del segundo trayecto.....	64
6.4 Reducción de errores con filtro de Kalman.....	67
7. CONCLUSIONES.....	69

8. BIBLIOGRAFÍA.....	71
9. ANEXOS.....	72
9.1 Manual del Simulador.	72
9.1.1 Menú de Inicio.....	72
9.1.2 Introducir Área.	73
9.1.3 Propiedades/Coordenadas estaciones.....	74
9.1.4 Introducir Trayectorias.....	76
9.1.5 Propiedades en la transmisión.	79
9.1.6 Resultados.	80
9.1.6.1 Resultados estudio por trayecto.	81
9.1.6.2 Resultados estudio por área.	83
9.2 Listado de funciones utilizadas en el simulador.....	84

Índice de figuras

Figura 1. Alturas en el mapa en las inmediaciones del aeropuerto de Innsbruck, Austria.	9
Figura 2. Clasificación de sistemas para ATC.....	12
Figura 3. Funcionamiento PSR.....	13
Figura 4. Funcionamiento SSR.....	15
Figura 5. Funcionamiento ADS-C.....	16
Figura 6. Funcionamiento ADS-B.....	17
Figura 7. Funcionamiento Sistema Multilateración.....	20
Figura 8. Intersección de tres hiperboloides.....	20
Figura 9. Cálculo TDOA a partir de TOA.....	22
Figura 10. Métodos de posicionamiento en sistemas de multilateración.....	23
Figura 11. Posicionamiento 3D.....	24
Figura 12. Trayectoria de aeronaves en Innsbruck.....	25
Figura 13. Transpondedor embarcado en la aeronave.....	26
Figura 14. Estación central de procesamiento en un sistema de multilateración.....	27
Figura 15. Estación receptora en un sistema de multilateración.....	28
Figura 16. Estación interrogadora en un sistema de multilateración.....	29
Figura 17. Ejemplo de arquitectura de sistema de multilateración.....	30
Figura 18. CRLB con RMS de una trayectoria.....	33
Figura 19. CRLB, área aeropuerto Innsbruck.....	34
Figura 20. Extracto de código de la función compare_alg.....	35
Figura 21. Ejemplo RMS algoritmos.....	37
Figura 22. RMS filtrado y sin filtrar.....	38
Figura 23. RMS, Errores en el filtro de Kalman.....	39
Figura 24. Esquema de la herramienta.....	40
Figura 25. Visualizar CRLB y RMSE.....	43
Figura 26. Aeropuerto Innsbruck, 7 trayectorias.....	44
Figura 27. Trayectos 2D,3D y su altura.....	45
Figura 28. Interfaz de resultados CRLB en el estudio por área.....	46
Figura 29. CRLB en terreno montañoso, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 15 metros de mástil.....	49
Figura 30. CRLB en terreno montañoso, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia.....	49

Figura 31. CRLB en terreno montañoso, escenario 2, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 15 metros al mástil.	50
Figura 32. CRLB en terreno montañoso, escenario 2, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia.....	50
Figura 33. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia.	51
Figura 34. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 2 ns al error instrumental(10ns).....	52
Figura 35. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 4 ns al error instrumental(12ns).....	52
Figura 36. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2.	54
Figura 37. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2, añadiendo 27 dB a las pérdidas de recepción(30dB).	55
Figura 38. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2 añadiendo 30 dB a las pérdidas de recepción(33dB).	55
Figura 39. Comparación de la contribución del error instrumental con la de SNR, para la configuración de la tabla 2.	56
Figura 40. CRLB, geometría cuadrada,4 estaciones,3000 m de altitud barométrica.	57
Figura 41. CRLB, geometría triangular, 4 estaciones,3000 m altitud barométrica.....	57
Figura 42.CRLB, geometría pentagonal, 5 estaciones,3000 m altitud barométrica.....	58
Figura 43. CRLB, geometría cuadrada, 5 estaciones,3000 m altitud barométrica.....	58
Figura 44.CRLB en zona montañoso, geometría cuadrada, 4 estaciones, 4000 m altitud barométrica.....	59
Figura 45. CRLB en zona montañoso, geometría triangular, 4 estaciones, 4000 m altitud barométrica.....	59
Figura 46. CRLB en zona montañoso, geometría pentagonal, 5 estaciones, 4000 m altitud barométrica.....	60
Figura 47. CRLB en zona montañoso, geometría cuadrada, 5 estaciones, 4000 m altitud barométrica.....	60
Figura 48. Terreno Albacete, dos trayectorias, geometría de estaciones romboidal.....	62
Figura 49. CRLB en Albacete, geometría romboidal a 3000 metros de altitud barométrica.....	63
Figura 50. CRLB y RMSE de la trayectoria 1.....	63
Figura 51. Trayectorias de los algoritmos en 2D y sus alturas.	64
Figura 52. CRLB en Albacete, geometría romboidal a 1300 metros de altitud barométrica.....	65
Figura 53. CRLB y RMSE de la trayectoria 2.....	65

Figura 54. Trayectorias de los algoritmos en 2D y sus alturas.	66
Figura 55. CRLB y RMSE de una trayectoria en Innsbruck.	67
Figura 56. RMSE con Schmidt y con Schmidt filtrado con Kalman.	67
Figura 57. Trayectoria 2D y alturas, Schmidt y Schmidt filtrado.	68

Índice de tablas.

Tabla 1. Datos de referencia.....	48
Tabla 2. Datos de referencia, segundo modelo.....	54
Tabla 3. Datos de referencia, tercer modelo.....	61

1.INTRODUCCIÓN

Un sistema de multilateración es una técnica de posicionamiento hiperbólica independiente y cooperativa basada en la medida de la diferencia de tiempos de llegada de la señal (TDOA: Time Difference Of Arrival) transmitida por la aeronave hasta un conjunto de estaciones base receptoras sincronizadas extendidas por toda el área que abarca este sistema. La medida de los tiempos de llegada (TOA) de cada estación es enviada a una estación central de procesamiento (CPS: Central Processing Station) donde se ejecuta un conjunto de algoritmos para detectar la existencia, identificar y obtener la localización del objetivo.

En la multilateración se utilizan 3 o más estaciones receptoras para conseguir una localización hiperbólica de un punto del espacio bidimensional o tridimensional a partir de las diferencias de los tiempos de llegada a cada estación receptora (TDOA's) que son calculados en la estación central de procesamiento.

Estos sistemas se están utilizando cada vez más para el control de tráfico aéreo ya que se utilizan para informar a los controladores aéreos de la localización e identificación de los objetivos dentro del área de cobertura; además tienen una mayor precisión que el SSR (Sistema de Radar Secundario) y su implementación es mucho menos costosa.

1.1 Necesidad de los sistemas de multilateración para vigilancia aérea.

El continuo aumento del tráfico aéreo y las características topográficas de los terrenos en los aeropuertos y sus alrededores son dos factores que afectan de manera directa al rendimiento de los dispositivos para el posicionamiento de aeronaves en el área de cobertura. Los sistemas de localización trabajan con tiempos de actualización de las posiciones de las aeronaves, donde estas posiciones tienen ciertos errores debido a factores tanto internos como externos a los dispositivos utilizados; por lo tanto las aeronaves tienen que guardar una cierta separación para salvaguardar la seguridad frente a la incertidumbre de las posiciones proporcionadas por los sistemas de vigilancia.

La multilateración en el TMA (Área Terminal de Maniobras) generalmente maneja altas densidades de tráfico, ya que su espacio aéreo puede cubrir varios aeropuertos donde hay muchos aviones concentrados destinados a despegar o aterrizar. Por consiguiente, los sistemas establecidos en los aeropuertos necesitan proporcionar una cobertura y precisión adecuadas con continuidad, para que los controladores gestionen el tráfico aéreo eficientemente. También se

tiene que tener en cuenta que en el TMA (Área de Terminal de Maniobras) las aeronaves tienen unas alturas relativamente bajas, por lo que el terreno del aeropuerto y sus inmediaciones, como ya se ha dicho, afectará de manera directa al rendimiento de los sistemas debido a que se pueden presentar problemas de visión radioeléctrica con las aeronaves y por lo tanto cálculos erróneos en su posicionamiento.

La siguiente imagen (Figura 1) corresponde a las inmediaciones del aeropuerto de Innsbruck (Austria), donde se puede observar que posee un terreno montañoso, que dificulta la visión radioeléctrica.

Este aeropuerto registra un tráfico medio de 200 operaciones de vuelo diarias, por lo que requiere de un sistema capaz de trabajar con las dificultades que se han comentado.

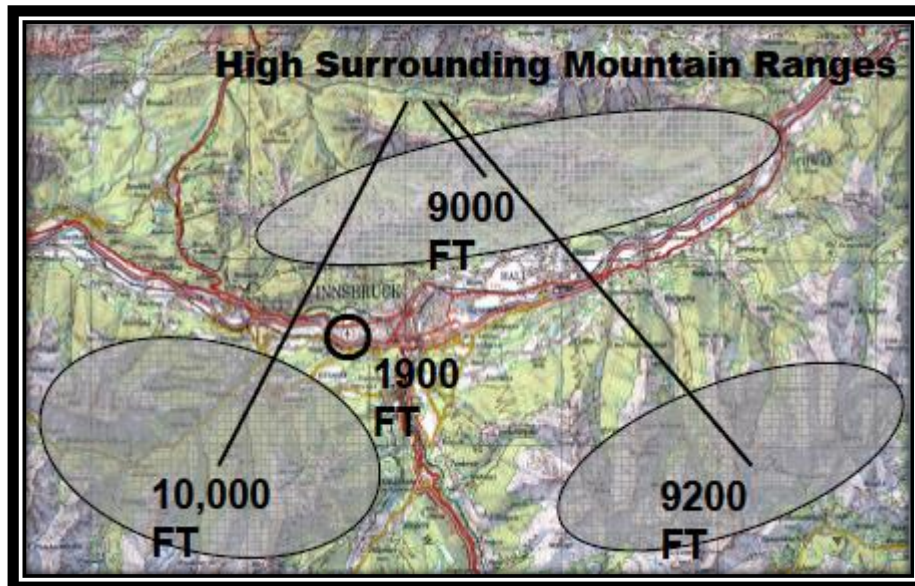


Figura 1. Alturas en el mapa en las inmediaciones del aeropuerto de Innsbruck, Austria.

Los sistemas de multilateración proporcionan unas prestaciones mejores en las áreas enfocadas a este proyecto (TMA), respecto a las otras tecnologías utilizadas en vigilancia aérea (Radar primario, SSR Modo S, ADS-B) que ya se discutirán más adelante. Estos sistemas tienen una red de sensores receptores desplegada por toda el área de cobertura, lo que facilita una rápida identificación de los objetivos y puede trabajar en terrenos con obstáculos que dificultan la visión directa, aunque la altura de las aeronaves sea baja. También poseen una alta tasa de actualización, lo que permite el uso continuo de la localización para facilitar la labor de los controladores de

tráfico aéreo. Para el uso de estos sistemas es necesario tener un transpondedor activo en las aeronaves para emitir las señales a los sensores receptores de las estaciones, pero el coste de poner en marcha este tipo de sistema es más asequible que los sistemas de radar primario o SSR Modo S, a la vez que también es más fácil su expansión y mantenimiento [7].

2. VIGILANCIA ATM

2.1. Introducción al ATM

En el mundo de la aviación se utiliza la expresión CNS/ATM (Comunicaciones-Navegación-Vigilancia/Gestión del Tráfico Aéreo), para referimos a cuatro puntos en concreto:

Los sistemas de navegación aérea, que nos proporcionan los recursos para conocer la posición y el trayecto deseado de cada aeronave para ayudar a que el piloto de la aeronave pueda seguir con el trayecto previsto.

Las comunicaciones aeronáuticas que, nos suministran los medios para el intercambio de información entre aire y tierra y entre centros de control en tierra.

La vigilancia aérea, que nos facilita el seguimiento de aeronaves para conocer su posición, dirección y trayecto previsto.

La gestión del espacio aéreo también conocido como ATM (Air Traffic Management), que tiene la finalidad de mantener la seguridad y distancia entre las aeronaves y que todas ellas sigan el trayecto establecido de su vuelo [5].

Existen diferentes tipos de sistemas para la gestión del tráfico aéreo, cada uno de los cuales puede tener una mayor utilidad según a el servicio que le destinemos. A continuación expondremos los diferentes tipos de sistemas de vigilancia implementados en la actualidad, a la vez que comentaremos sus particularidades, diferencias y en qué tipo de aplicaciones de suelen utilizar.

2.2. Sistemas de Vigilancia ATM

En la actualidad hay dos modelos de sistemas para vigilancia ATM, los sistemas de vigilancia independientes y los sistemas de vigilancia dependientes. Los primeros se caracterizan porque no necesitan ayuda externa para detectar y posicionar el objetivo, mientras que los segundos necesitan de ayuda externa (básicamente de un GNSS: Global Navigation Satellite System) para detectar y posicionar el objetivo. En los sistemas de vigilancia dependientes solo existen cooperativos, los cuales requieren que la aeronave esté equipada con un transpondedor o emisor. Por su parte, los sistemas independientes pueden ser cooperativos o no cooperativos. En estos últimos, la aeronave es detectada independientemente de que esté equipada o no con un transpondedor. [7].

En la siguiente gráfica se puede ver mejor como se clasifican estos sistemas, para luego explicarlos más detalladamente.

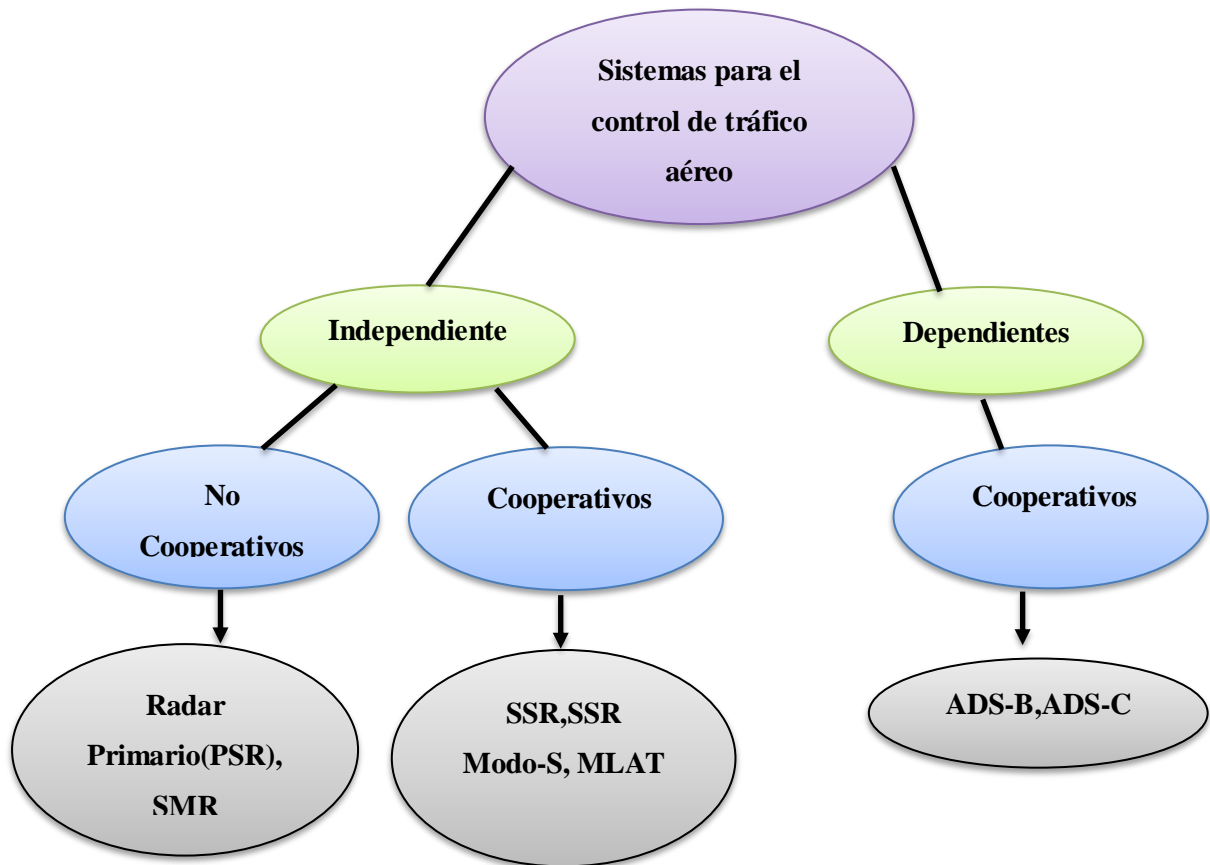


Figura 2. Clasificación de sistemas para ATC.

2.2.1 *Sistemas de Vigilancia Independientes*

Dentro de este grupo se encuentran los no cooperativos, donde aparece el radar primario (PSR) y el SMR (Surface Movement Radar) que es el modelo de radar primario para trabajar en entornos cercanos a la superficie, es decir para vigilancia aeroportuaria.

El funcionamiento del radar primario es el siguiente: el sistema emite pulsos de energía RF, que son reflejados en el blanco y llegan al radar donde se detectan estas reflexiones de impulsos de energía. Estas reflexiones son procesadas de manera que se obtiene la distancia radial y el ángulo del azimut al objetivo. La estación terrestre de este sistema consta de un transmisor, un receptor y una antena giratoria que abarca los 360 de azimut y gira a una velocidad típica entre 6 y 15 RPM.

Hay que tener en cuenta que todas las reflexiones que detecta el radar no provienen de los blancos que se quiere detectar, también se producen reflexiones en otros objetos fijos como edificios o montañas, que producen señales no deseadas. Para solucionar este problema se utilizan técnicas especiales de procesamiento para identificar el tipo de blanco o las dimensiones de este.

El radar primario es un sistema de vigilancia completamente independiente que entre los años 60 y 70 se utilizaba para vigilancia en ruta. Sin embargo, con el paso de los años este sistema se ha vuelto ineficiente debido a su elevado coste y al aumento del tráfico aéreo, ya que este sistema no proporciona una identificación directa del objetivo y tiene una baja tasa de actualización de la posición del objetivo. Actualmente se utiliza para fines de defensa militar aérea o para la vigilancia meteorológica [4].

La siguiente imagen muestra el funcionamiento típico de un radar primario:

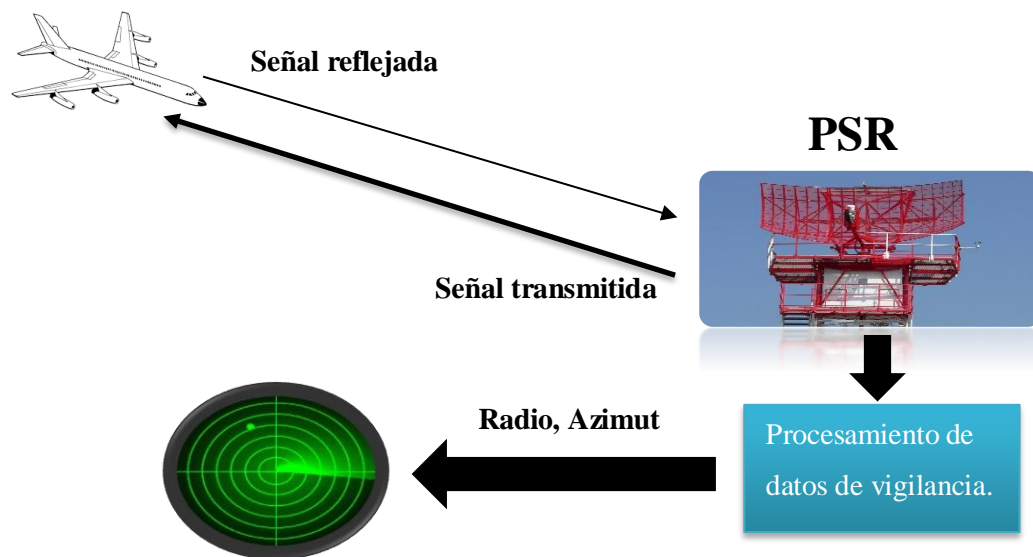


Figura 3. Funcionamiento PSR.

Dentro del grupo de los cooperativos nos encontramos con el radar secundario (SSR), el SSR Modo-S y los sistemas de multilateración.

El funcionamiento del radar secundario (SSR) es distinto al del primario, ya que para que funcione este sistema se necesita un transpondedor instalado en el avión y por lo tanto es un sistema cooperativo. Este sistema tiene una antena giratoria, cuya velocidad de rotación determina la frecuencia a la que se actualiza la información. La antena emite una señal de 1030 MHz (Interrogación) que le llega al transpondedor de la aeronave, el cual, con un retardo fijo

establecido, decodifica la interrogación y transmite una señal de respuesta a 1090 MHz. Esta señal de respuesta es recibida por la antena del radar, la cual es procesada para medir el tiempo de ida y vuelta de la señal. A partir de este tiempo de ida y vuelta se logra obtener el radio de la distancia al avión y a partir del ángulo de apuntamiento de la antena, el ángulo de azimut. La resolución de la distancia radial en el área de cobertura suele ser constante; sin embargo, la resolución del azimut es peor para las aeronaves más alejadas del radar.

La diferencia que existe entre el SSR y el SSR Modo-S es que mientras en el sistema de radar SSR los mensajes de interrogación enviados son recibidos y respondidos por todas las aeronaves en el área de cobertura, el SSR Modo-S envía el mensaje de interrogación selectivamente a un avión en concreto, obteniendo así una identificación directa.

El SSR funciona en modo A/C: los transpondedores de los aviones contestan a los mensajes de interrogación con un código de identidad (Modo A) o con la altitud barométrica de la aeronave (Modo C). El SSR Modo-S, además de trabajar en Modo A/C puede también trabajar en Modo S, lo cual le permite crear un enlace de datos de manera selectiva para cada aeronave.

A diferencia del radar primario, el SSR puede aportar una identificación directa del objetivo, además de su altitud barométrica y una mejor precisión del radio de distancia y azimut.

El sistema de radar SSR ha evolucionado a partir de aplicaciones militares desarrolladas con el fin de la identificación de aeronaves hostiles que posteriormente se han utilizado también en navegación aérea civil. Actualmente hay otras tecnologías que proporcionan unas mejores prestaciones, como los sistemas de multilateración, la tecnología ADS-B o ADS-C [4].

La siguiente imagen muestra el funcionamiento característico de los radares secundarios (SSR):

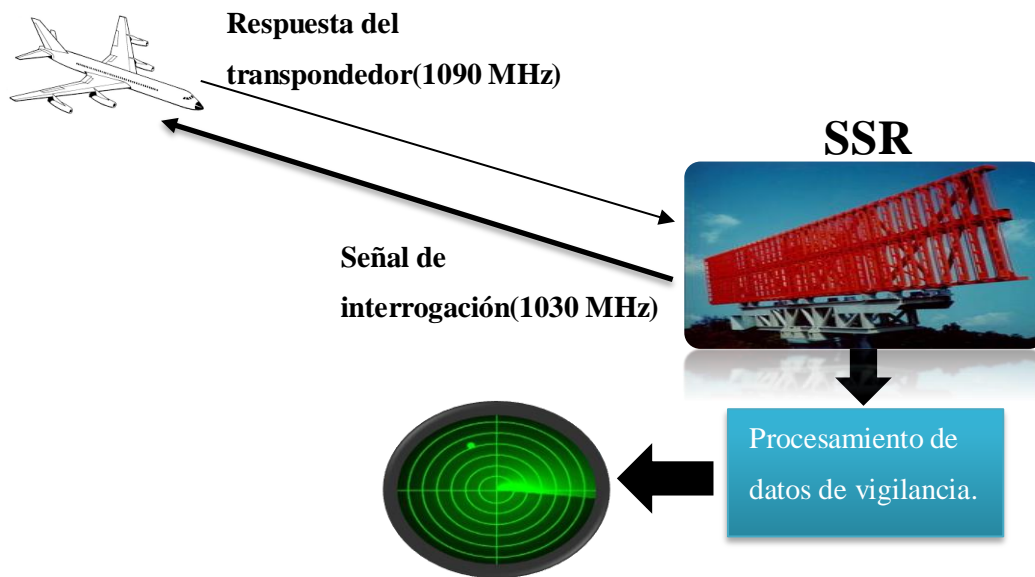


Figura 4. Funcionamiento SSR.

La tecnología que nos falta por comentar dentro de los sistemas de vigilancia independientes son los sistemas de multilateración; sin embargo esta técnica la comentaremos en el punto 3 más detalladamente.

2.2.2 *Sistemas de Vigilancia Dependientes*

En este grupo de sistemas de vigilancia encontramos la tecnología ADS-C (Automatic Dependent Surveillance-Contract) y ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast).

En ADS-C, para determinar la posición, velocidad y otros datos de interés de la aeronave, esta hace uso de un sistema de navegación a bordo. Un sistema ATM desde tierra establece un acuerdo con la aeronave para enviar los datos de información en ciertos periodos de tiempo o en eventos definidos. El operador de la aeronave y el proveedor de ATM establecen un conjunto de acuerdos con el proveedor de servicios del enlace de datos, para una comunicación punto a punto donde es posible el envío de los mensajes ADS-C.

La información que se transmite en los mensajes ADS-C puede ser la posición actual de la aeronave (latitud, longitud y altura), una marca de tiempo, posibles futuros puntos del trayecto del areonave (waypoints) para poder evitar conflictos potenciales, velocidad de la aeronave y datos meteorológicos.

Este tipo de sistema se utiliza generalmente en áreas oceánicas, donde no es posible el uso de radares o sistemas de multilateración; es decir: se utiliza fundamentalmente en aviones de transporte aéreo que realizan grandes trayectos.

También hay que añadir que este sistema tiene ciertas desventajas y limitaciones que hay que comentar. Al ser un sistema de vigilancia dependiente, se necesita que la aeronave esté equipada para la transmisión de los mensajes; además, el sistema puede estar limitado por la capacidad que pueden tener los medios de comunicación utilizados. En esta técnica las transmisiones de los informes pueden tener ciertos costes, ya que se utiliza un proveedor de servicios de enlace de datos; por este motivo, los sistemas ADS-C utilizan normalmente unas tasas de actualización bajas para mantener los costes acotados [4].

En la siguiente figura podemos ver el funcionamiento de la tecnología ADS-C.

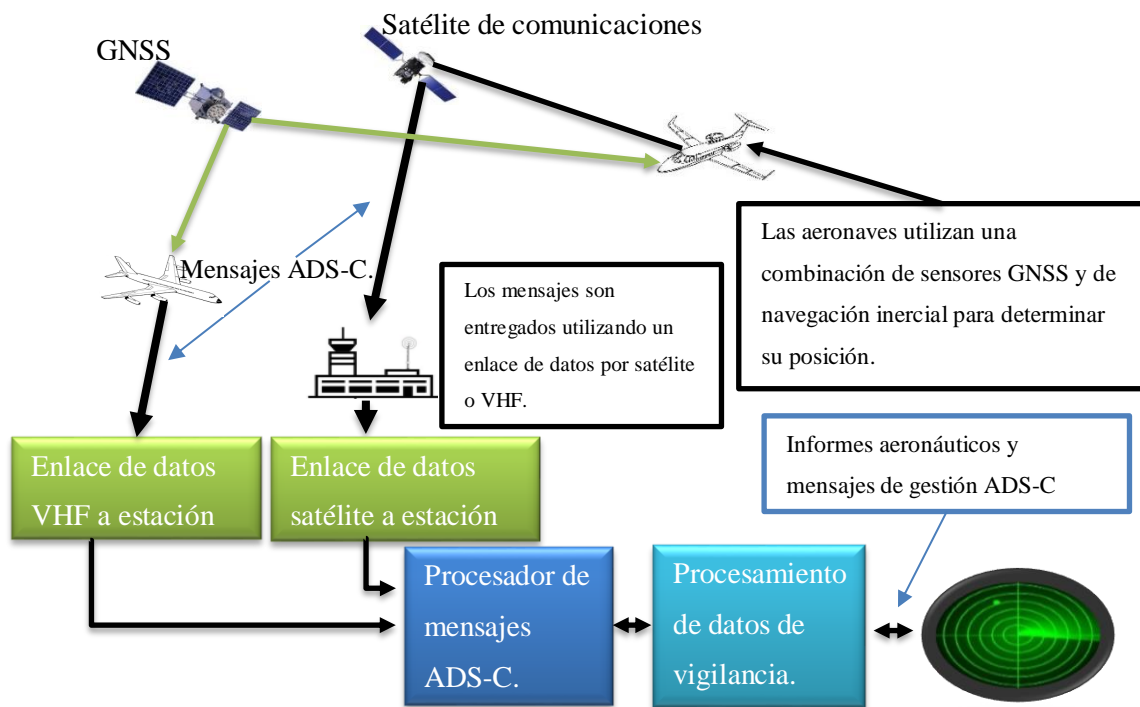


Figura 5. Funcionamiento ADS-C.

La otra tecnología que falta por comentar dentro de este grupo es la ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast). Esta técnica emplea un sistema de navegación satelital o GNSS, mediante el cual se obtiene información de la posición de la aeronave (latitud, longitud, altitud), velocidad, identificador de la aeronave y otra información práctica. Cada mensaje ADS-B incluye una descripción de la calidad de los datos para que el usuario pueda determinar si suficientemente buenos para poderlos aplicar a la función deseada.

Los mensajes ADS-B pueden ser recibidos y procesados por cualquier receptor adecuado, es decir los mensajes pueden ser recibidos por medio de un enlace de datos a una agrupación de estaciones en tierra, donde se procesan los datos y son enviados al centro de control, o bien pueden ser recibidos en aeronaves equipadas con receptores ADS-B, donde se procesa la información para poder determinar la ubicación del tráfico de aeronaves cercanas y poder visualizar la información de tráfico en la cabina de mando de la aeronave y de esta manera poder evitar futuras colisiones. A este intercambio de información entre aeronaves se le conoce como sistema de prevención de anticollision aérea (ACAS: Airborne Collision Avoidance System) [7].

En esta tecnología las estaciones terrestres son más simples que las del radar primario, secundario o multilateración y suele tener unos costes más bajos.

También habría que comentar que en este sistema existen ciertas desventajas que afectan a la precisión y rendimiento de este. El funcionamiento de ADS-B depende de que las aeronaves dispongan el equipamiento necesario para poder realizar la comunicación de los mensajes entre avión y estación o entre aviones. Las tecnologías actuales utilizan únicamente GPS y GLONASS para el cálculo de la posición y velocidad debido a lo cual el sistema puede experimentar interrupciones cuando el rendimiento o la geometría de la constelación de satélites son inadecuados para realizar una aplicación en concreto [4].

La imagen siguiente correspondería a el funcionamiento de la tecnología ADS-B.

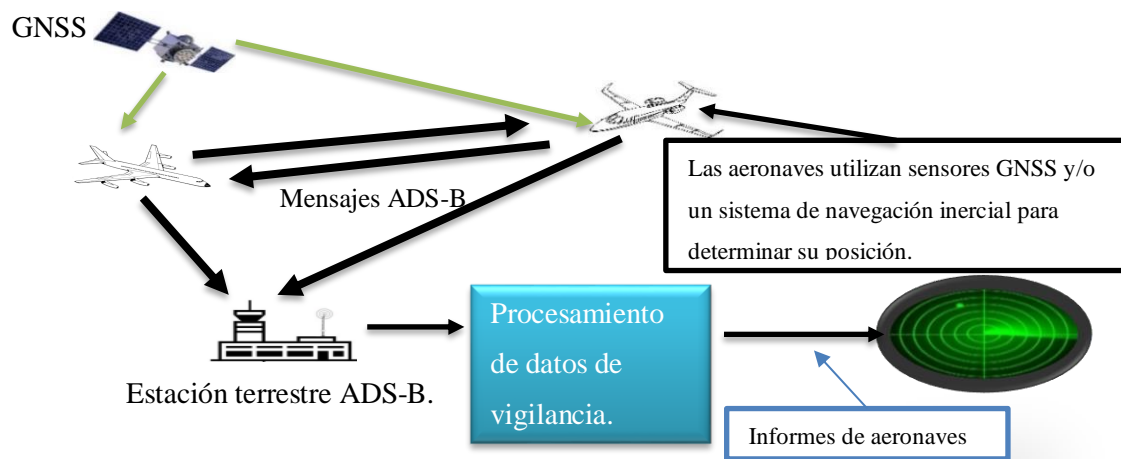


Figura 6. Funcionamiento ADS-B.

3.SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN

3.1 Funcionamiento.

Un sistema de multilateración, como se ha dicho anteriormente, es un sistema de posicionamiento independiente y cooperativo que está formado por estaciones receptoras sincronizadas en tiempo y (opcionalmente) estaciones interrogadoras extendidas en toda el área de cobertura. El sistema también dispone de una computadora central (CPS: Central Processing Station) donde se ejecutan los algoritmos necesarios para calcular la posición de la aeronave [7].

El sistema puede trabajar de modo activo o modo pasivo. La diferencia entre ambos modos de funcionamiento es que en el activo el sistema cuenta con una o varias estaciones interrogadoras utilizadas para enviar sus propias interrogaciones, solicitando información adicional al transpondedor del avión no disponible en los mensajes enviados de manera no solicitada. En el sistema pasivo no se utiliza la estación interrogadora, por lo que sólo se utilizan las señales enviadas por el transpondedor.

El transpondedor de las aeronaves envía cada cierto tiempo, conocido como tiempo de actualización, una señal de 1090 MHz que es recibida por las estaciones. En cada una de las estaciones se mide el TOA (Time Of Arrival) , el cual se puede expresar como la siguiente fórmula:

$$\widehat{TOA}_i = t_e + \frac{r_i}{c} + n_i \quad (1)$$

Esta fórmula representa el TOA medido en cada estación, donde t_e es el tiempo en que el transpondedor ha emitido la señal y no es conocido por las estaciones, r_i representa la distancia entre la aeronave y la estación i , c es la velocidad de luz en el vacío y el término n_i representa un término de error en las medidas, cuyo valor depende de diversos factores como los errores de instrumentación en el dispositivo de medidas, la calidad de la señal recibida, las ganancias de las antenas de transmisión y recepción, errores de cuantificación, efecto multicamino o sincronización de las estaciones[7].

La fórmula anterior se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\widehat{TOA}_i = t_e + \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + n_i \quad (2)$$

En esta ecuación x, y, z representan la posición del transpondedor del avión y x_i, y_i, z_i representan la posición de cada estación.

Estos tiempos de llegada de las señales en cada estación son enviados a la estación central de procesamiento donde se determinan los TDOA (Time Difference Of Arrival), que serán las diferencias entre los tiempos de llegada a cada una de las estaciones y a una de ellas que es escogida como estación de referencia [7].

La fórmula del TDOA se puede escribir de la siguiente manera:

$$\widehat{TDOA}_{i,1} = \widehat{TOA}_i - \widehat{TOA}_1 \quad (3)$$

$$\widehat{TDOA}_{i,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \frac{1}{c} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + n_{i,1} \quad (4)$$

Donde ahora x_1, y_1, z_1 es la posición de la estación de referencia y $n_{i,1}$ es el término de error equivalente. Como se puede ver, en la ecuación (4) se ha eliminado el valor t_e (tiempo de emisión) que no era conocido y que aparecía en la ecuación (2) del TOA. Esta es una de las ventajas de utilizar este sistema, ya que no importan los tiempos en que los transpondedores emiten las señales que van a ser recibidas en las estaciones. El TDOA representa matemáticamente un hiperboloide en el espacio con un cierto espesor (debido al error de medida) dentro del cual debería estar ubicado el transpondedor de la aeronave. La intersección de un conjunto de estos hiperboloides define dónde se encontraría la aeronave. Así, para posicionar la aeronave en dos dimensiones necesitaríamos como mínimo tres estaciones (3 valores de TOA's) para tener al menos 2 hiperboloides cuya intersección determina un área de incertidumbre donde estaría la aeronave. Para un posicionamiento en 3 dimensiones se necesitan 4 o más estaciones (4 o más valores de TOA's), es decir 3 o más hiperboloides cuya intersección define el volumen donde posicionar la aeronave. En general se utilizan más de 4 estaciones en los aeropuertos para obtener una mejor precisión en el posicionamiento del blanco y una mayor redundancia [7].

La siguiente imagen muestra el típico funcionamiento de un sistema de multilateración:

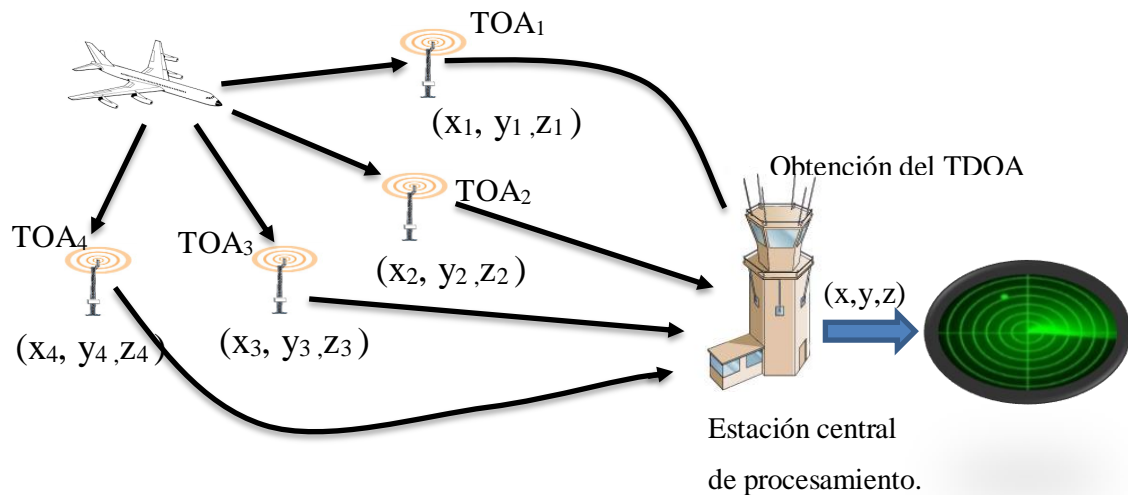


Figura 7. Funcionamiento Sistema Multilateración.

Y a continuación podemos ver el funcionamiento de esta tecnología al usar hiperboloides para calcular mediante su intersección el volumen en el espacio donde se encontraría la aeronave:

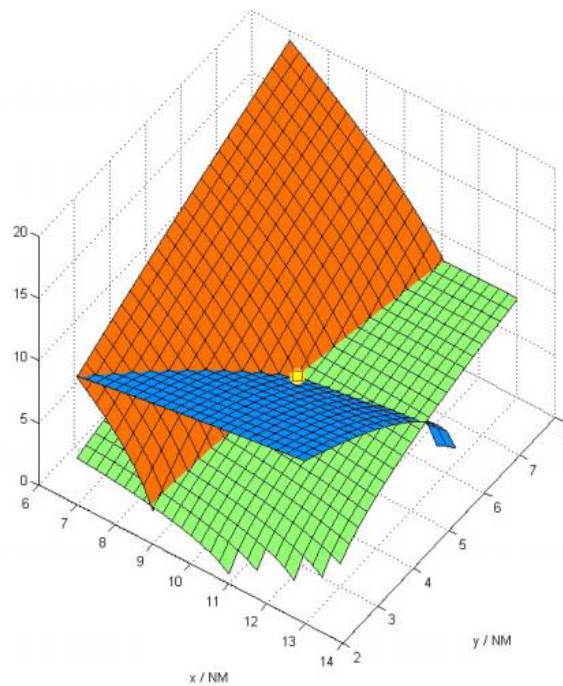


Figura 8. Intersección de tres hiperboloides.

En ausencia de error, los hiperboloides serían superficies planas cuya intersección se daría en un solo punto en el espacio donde se ubicaría la aeronave, pero para que eso fuera posible se debería de cumplir una serie de requisitos como una sincronización perfecta entre los relojes de las

estaciones, o que los receptores de las estaciones base fueran perfectos y el sistema no introdujera ruido [1]. Pero esto en la realidad no sucede así y se tiene que trabajar con áreas y volúmenes de incertidumbre donde se ubica el transpondedor de la aeronave. La precisión de los sistemas dependerá tanto de factores externos como internos, de los que ya se hablará más adelante. Será objeto de estudio en el trabajo investigar cuales son los factores que más afectan a la precisión de estos sistemas.

3.2 Medición y estimación del TDOA.

Como habíamos comentado para poder ubicar las aeronaves en un área o volumen en el espacio necesitábamos calcular los TDOA's (diferencia en los tiempos de llegada) para poder realizar un posicionamiento hiperbólico. Existen dos métodos para calcular los TDOA's, a partir del TOA (tiempo de llegada) de cada señal a cada estación o mediante la correlación cruzada, aunque esta última no la vamos a describir en la memoria, ya que en secciones anteriores nos hemos referido siempre al primer método(cálculo de TDOA's a partir de TOA), porque en los sistemas de multilateración aeronáuticos se utiliza siempre esta técnica [1].

3.2.1 A partir del TOA de cada señal.

Este método se calcula los TDOA's a partir de los tiempos de llegada de la señal(TOA) a cada estación, siguiendo una serie de procesos que descritos a continuación [1 y 7]:

- Se recibe la señal del transpondedor(1090MHz) en el bloque demodulador y se convierte a señal banda base.
- La señal banda base se digitaliza mediante un conversor analógico-digital en el bloque digitalización.
- El bloque de medición de TOA asociado al receptor calcula el tiempo de llegada de la señal(TOA) de la señal digitalizada, donde el contenido del mensaje se extrae para posteriormente poder realizar la correlación.
- En el bloque de correlación TDOA los valores TOA's ya obtenidos son correlacionados para poder asociarlos al mismo blanco y posteriormente se calculan los TDOA's.
- Finalmente, mediante algoritmos de posicionamiento se calcula la ubicación de la aeronave y estas son filtradas para eliminar errores y mejorar su precisión.

En la siguiente imagen se puede ver el funcionamiento de esta técnica:

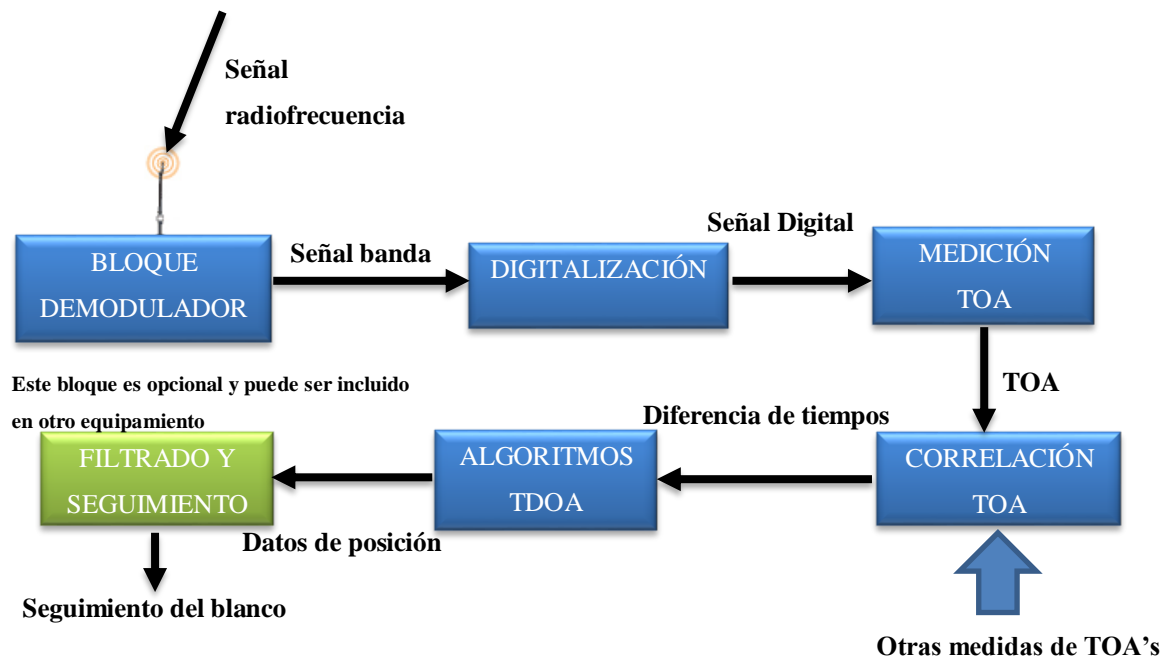


Figura 9. Cálculo TDOA a partir de TOA.

En este punto también habría que decir que para poder realizar el posicionamiento correcto mediante la utilización de TDOA's tenemos que tener las estaciones sincronizadas en tiempo, ya que los TDOA son diferencias en el tiempo de llegada de las señales (provenientes del transpondedor de la aeronave) a cada estación. Por lo tanto, para obtener unos TDOA's precisos para un posterior posicionamiento de la aeronave necesitamos esa sincronización temporal.

Hay diferentes arquitecturas para mantener una sincronización precisa en las estaciones, pero no las vamos a describir en detalle porque no es motivo de estudio en este trabajo, aunque sí se tiene que tener en cuenta que para diseñar un sistema de multilateración es una de las partes fundamentales porque afecta directamente al rendimiento del sistema.

3.3 Cálculo de la posición.

En los sistemas de multilateración existen diferentes técnicas para posicionar las aeronaves, pudiendo representar estas en un sistema de tres dimensiones (x,y,z) o de dos dimensiones (x,y); adicionalmente, la altura de la aeronave se puede calcular mediante sistemas de navegación satelital o mediante barómetros instalados en el aeronave.

En esta sección se explicará los diferentes métodos para el cálculo de posiciones del avión que vienen esquematizados en la siguiente figura:

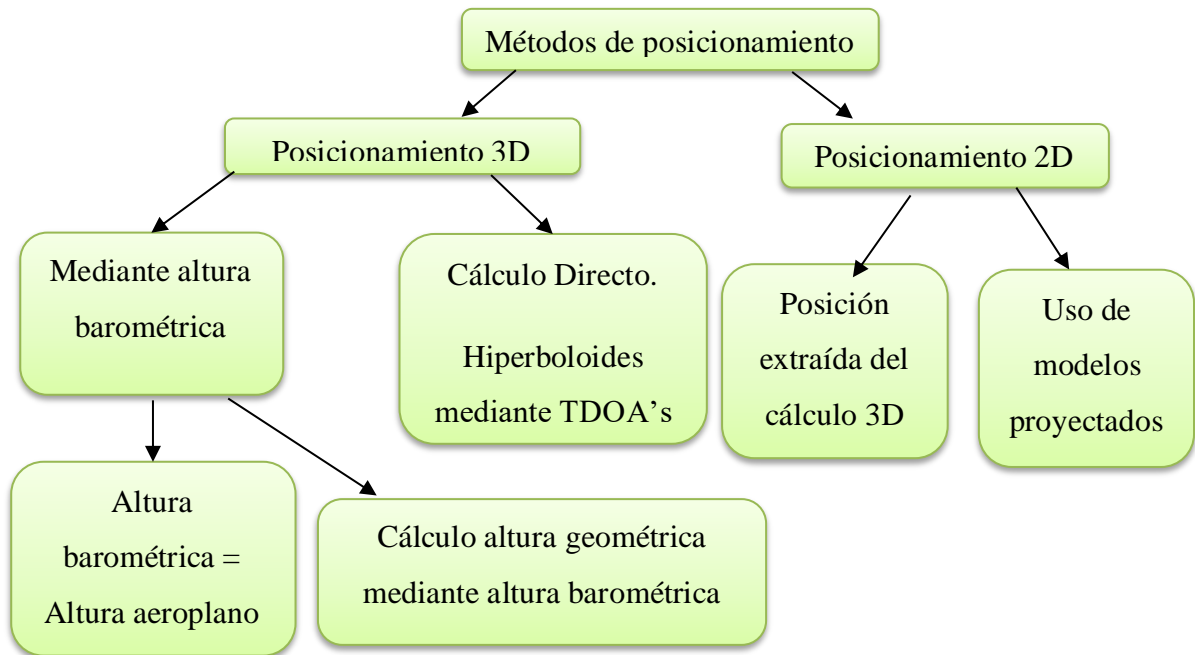


Figura 10. Métodos de posicionamiento en sistemas de multilateración.

3.3.1 Posicionamiento 3D.

La posición 3D de una aeronave se puede obtener principalmente de dos formas: utilizando directamente los TDOA's calculados para posicionar la aeronave mediante hiperboloides o utilizando la altura barométrica. La altura barométrica se puede aplicar en dos técnicas: la primera consiste en utilizar la altura barométrica directamente como altura del aeroplano, un método poco eficiente ya que la altitud barométrica es la altura del avión sobre el nivel del mar y no la altura real; la segunda técnica consiste en utilizar esta altura barométrica para ayudar a calcular la altura geométrica del avión. Esta última técnica puede ser útil cuando se realiza un posicionamiento mediante hiperboloides y estas intersecan en más de un espacio geométrico en donde queremos ubicar el aeroplano. Con la ayuda extra de la altura barométrica podemos saber en qué espacio geométrico se encontrará el avión [7].

La siguiente figura representa un posicionamiento 3D de 4 estaciones:

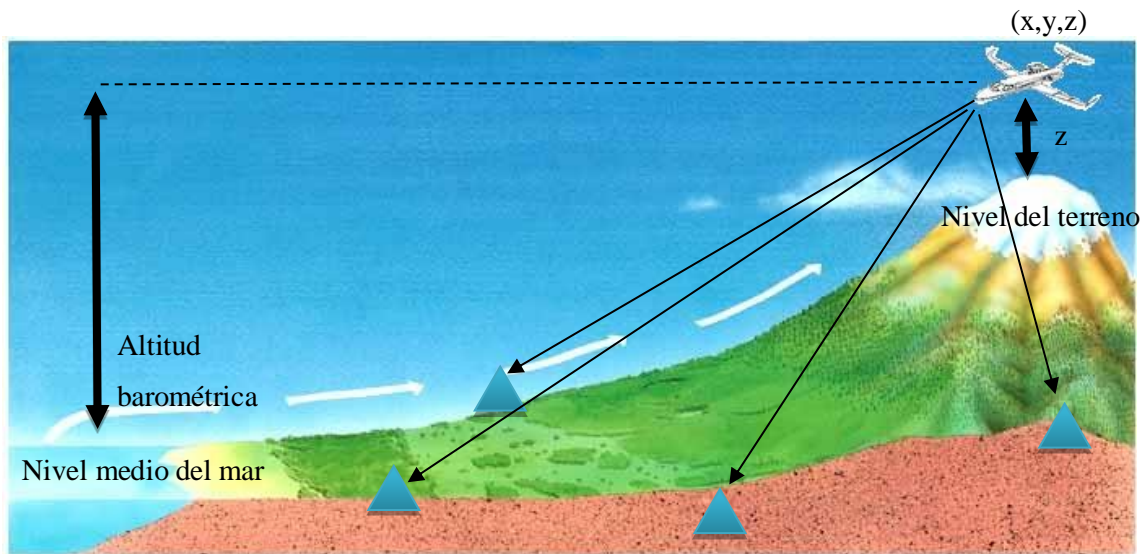


Figura 11. Posicionamiento 3D.

3.3.2 Posicionamiento 2D.

Para este método existen dos técnicas: la primera consiste en utilizar modelos proyectados sobre un plano horizontal, una opción práctica para realizar cálculos en áreas de superficie, pero no para trabajar con aeronaves con cierta altura, ya que esta técnica introduce un error constante (sesgo) proporcional a la altura de la aeronave. La segunda técnica a comentar consiste en realizar el cálculo en 3D y tomar las componentes de interés (x , y); esta opción, al contrario que la técnica de modelos proyectados, no es un método muy eficiente para posicionamiento de superficie [7].

La técnica usada en el simulador es la del posicionamiento 3D mediante el cálculo directo utilizando hiperboloides, de manera que en la interfaz gráfica desarrollada se pueden ver estos los trayectos calculados en dos y tres dimensiones. En otra de sus opciones el programa muestra un mapa con los trayectos reales de los aviones en 2D utilizando coordenadas geográficas (latitud, longitud) y la altura barométrica expresada en pies.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de dos trayectorias reales de aeronaves dibujadas sobre el mapa en el entorno del aeropuerto de Innsbruck en Austria. Los ejes del mapa son coordenadas geográficas y en ciertos puntos de las trayectorias están representados la velocidad en nudos (kts) y la altura en pies, junto con el nombre del avión (AN1, AN2). También está representada las trayectoria calculada del aeronave AN1 mediante multilateración en dos y tres dimensiones, con los ejes de la representación en X,Y,Z.

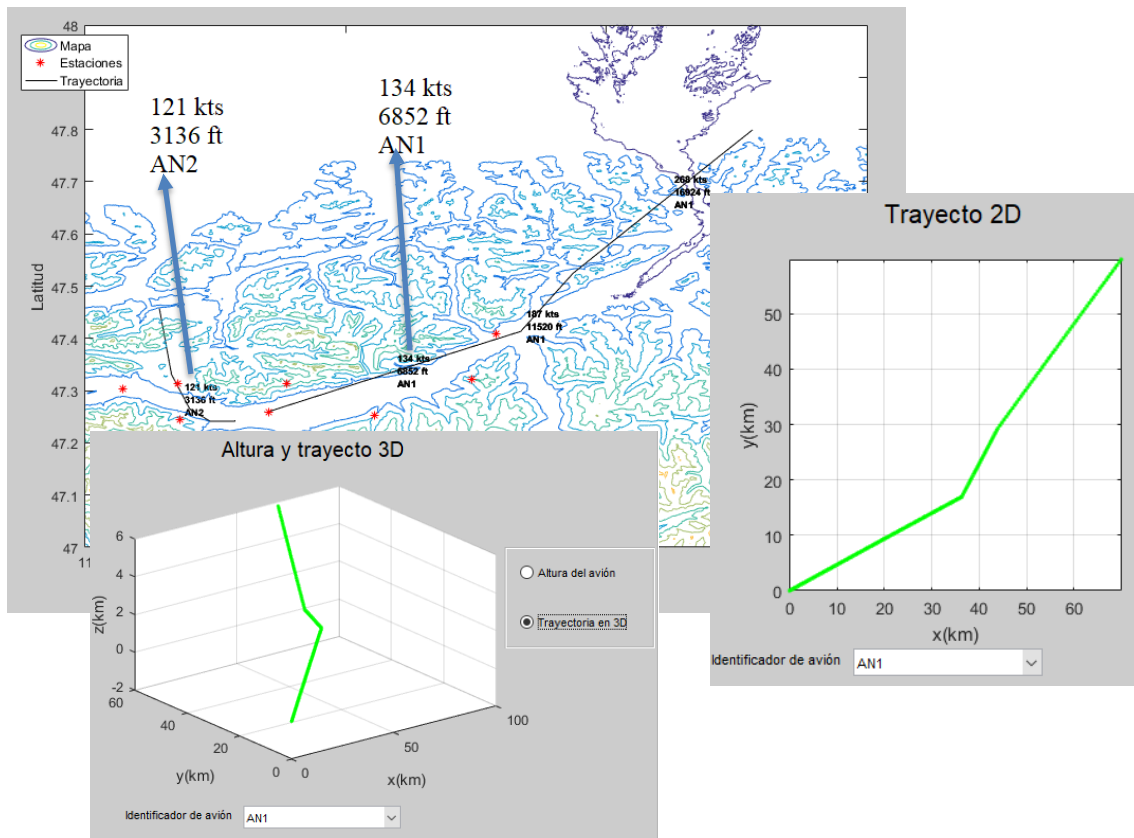


Figura 12. Trayectoria de aeronaves en Innsbruck.

3.4 Componentes del Sistema.

A continuación, describiremos los diferentes elementos y subsistemas que podemos encontrar en un sistema de multilateración. Se puede hacer una clasificación en dos grupos: los equipos utilizados en tierra y los equipos utilizados en las aeronaves.

Toda la información de este punto se ha obtenido de [1] y [7].

3.4.1 Equipamiento de la aeronave.

El equipo de la aeronave consiste fundamentalmente en el **transpondedor** con el que se encuentra equipado el avión, que se encarga de recibir y responder los mensajes de interrogación enviados desde tierra o aire, a la vez que transmitir información útil (velocidad, aceleración, identidad, altitud barométrica, dirección ICAO, posición GNSS) de manera periódica para un correcto funcionamiento del sistema.

Como ya se ha comentado anteriormente, el transpondedor es necesario en los sistemas de multilateración ya que estos son sistemas independientes-cooperativos, en los que se requiere la colaboración de la aeronave para poder localizarla.



Figura 13. Transpondedor embarcado en la aeronave.

Para el diseño del simulador se han tenido en cuenta algunas características importantes del equipamiento de la aeronave para realizar los cálculos y obtener los resultados. Específicamente, las propiedades del equipamiento abordo de la aeronave cuyo conocimiento es necesario para realizar los cálculos son: la potencia de transmisión de la señal(dBm), la ganancia de la antena transmisora (dB) y las pérdidas en el transmisor (dB). Todos estos parámetros entran dentro las propiedades de transmisión donde se ha tenido en cuenta también las pérdidas por absorción atmosférica(dB/km).

3.4.2 Equipamiento en tierra.

- **Estación central de procesamiento:** es el componente del sistema de multilateración donde se realizan la mayoría de operaciones para gestionar la información obtenida y proporcionar el posicionamiento, la identificación y realizar el seguimiento de todas las aeronaves dentro del área de cobertura. Por geometría, normalmente se ubica en el centro de la red de estaciones receptoras, aunque esto depende del escenario en que se implante el sistema de multilateración, entre otros factores. Gestiona tanto las estaciones interrogadoras como las receptoras.



Figura 14. Estación central de procesamiento en un sistema de multilateración.

- **Estaciones receptoras:** reciben las señales de 1090MHz procedentes de los transpondedores embarcados en los aviones, de las cuales miden los TOA's y extraen información adicional útil. Toda esta información es transmitida a la estación central de procesamiento por medio de un sub-sistema de comunicaciones.

Las estaciones receptoras están compuestas por un conjunto de elementos que tienen unos parámetros que afectan al rendimiento y precisión del sistema y que se detallarán a continuación, dado que para el desarrollo del simulador hemos tenido en cuenta estos parámetros para realizar los cálculos y extraer los resultados.

En primer lugar las estaciones receptoras reciben la información mediante **una antena de 1090 MHz** (generalmente dipolo omnidireccional o sectorial en banda L), de la cual se han considerado en el simulador propiedades como la ganancia que esta aporta así como las pérdidas que pueda generar.

La antena va unida a un **amplificador de señal** destinado a mejorar la calidad señal a ruido, donde hemos considerado su ganancia como propiedad importante.

El **módulo de recepción** es otro elemento dentro de las estaciones receptoras, encargado de medir los tiempos de llegada y extraer información útil de los mensajes recibidos. Los parámetros relevantes de este elemento son su ancho de banda (Hz), sensibilidad (dBm),

margen sobre la sensibilidad(dB), factor de ruido(F) y error instrumental del receptor (segundos).

Otros componentes de las estaciones receptoras serían el **cableado utilizado** (el cual puede introducir pérdidas) y el **mástil de la antena**, donde en el simulador se ha tenido en cuenta su altura (metros) como propiedad importante ya que puede afectar a la visibilidad radioeléctrica de las estaciones sobre la aeronave. Los componentes para sincronizar las estaciones también son fundamentales, ya que la precisión que estos pueden aportar afectan de manera directa al cálculo de los TDOA's y al posicionamiento de la aeronave. El efecto del error de sincronización se incluye en el término de error instrumental. Finalmente, se tienen los elementos del sub-sistema de comunicación para enviar la información a la estación central de procesamiento y de los que se hablará más detenidamente en este punto más adelante.

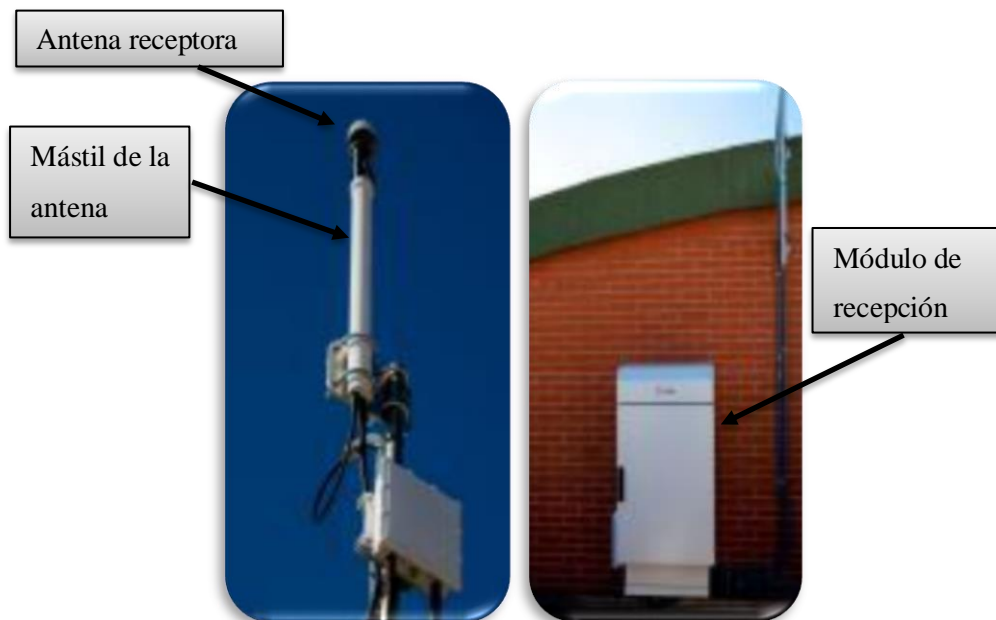


Figura 15. Estación receptora en un sistema de multilateración.

- **Estaciones Interrogadoras:** Se utilizan en los sistemas activos y son las que transmiten las señales interrogadoras de 1030 MHz a los transpondedores de las aeronaves que se encuentran en el área de cobertura mediante antenas omnidireccionales o sectoriales. No vamos a comentar los componentes de estas estaciones ni sus parámetros, ya que no las hemos utilizado en nuestro diseño. Esto es debido a que en nuestro simulador se calculan los tiempos de llegada de las señales provenientes de los transpondedores de los aviones

en las estaciones receptoras, y no hemos considerado estaciones interrogadoras en el proceso.

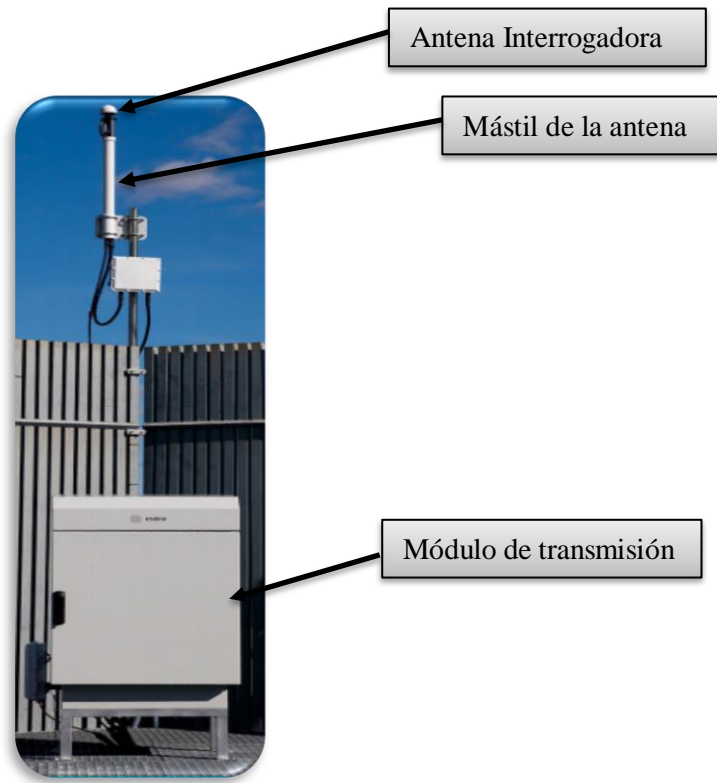


Figura 16. Estación interrogadora en un sistema de multilateración.

- **Sub-sistema de gestión:** es el encargado de controlar el estado y funcionamiento del sistema. Tiene la capacidad de configurar los parámetros del sistema y puede ser local o remoto. Un ejemplo de este subsistema se puede ver en la figura 18.
- **Sub-sistema de comunicaciones:** es el encargado de realizar la interconexión entre todos los componentes del sistema de multilateración, entre estos componentes podemos destacar la importancia en la conexión entre estaciones interrogadoras o receptoras con la estación central de procesamiento. La tecnología utilizada por estos subsistemas depende del entorno en que se encuentren y su uso, entre ellas podemos encontrar fibra óptica, par trenzado, enlaces de microondas y enlaces satelitales. Un ejemplo de este elemento se puede ver en la figura 18.

- Otros componentes del sistema también importantes y que se pueden ver en la figura 18 serían: una red de datos, un sistema referencial de tiempo, una computadora que analiza los datos y una pantalla para visualizar la información generada por el sistema.

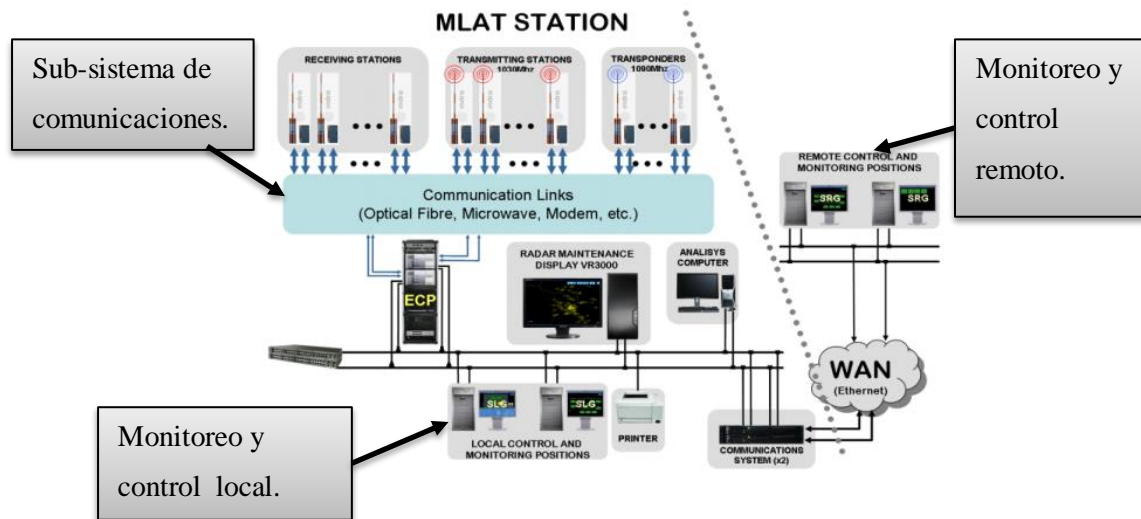


Figura 17. Ejemplo de arquitectura de sistema de multilateración.

3.5 Ventajas de la multilateración frente a otros sistemas.

En esta sección vamos a comentar los beneficios que se obtienen al utilizar esta técnica y realizaremos una comparativa con otras tecnologías como el radar secundario (SSR) o primario (PSR), con la información sacada de [1] y [7].

Los sistemas de multilateración pueden trabajar pasiva o activamente a diferencia el SSR o PSR y con el modo pasivo el sistema de multilateración puede reducir el tráfico de mensajes enviados. Esto es útil sobre todo en las áreas inmediatas a los aeropuertos donde el tráfico es mucho mayor por la concentración de aeronaves y vehículos.

Las tasas de actualización son mayores en el sistema de multilateración, otro punto a favor y más si tenemos en cuenta que este proyecto va destinado a mejorar la gestión de tráfico aéreo en área terminal de maniobras, donde se necesita actualizar la información rápidamente para que los controladores aéreos pueden gestionar el tráfico en la zona de cobertura.

Este sistema al tener desplegadas varias estaciones de recepción, puede tolerar el fallo o inactividad de una o varias de sus estaciones, por lo tanto es un sistema con redundancia, al contrario de los radares SSR o PSR que solo tienen un punto de fallo. El tener una red de

estaciones receptoras extendida también proporciona una mejora de visibilidad radioeléctrica frente a las tecnologías SSR y PSR. Esto aún es más notable en sistemas instalados en zonas montañosas.

Otra ventaja es que los sistemas de multilateración poseen una mayor precisión horizontal y vertical y mayores niveles de cobertura que los SSR y PSR a la vez que sus costes de instalación y mantenimiento son más asequibles y ofrecen una identificación automática del blanco.

4. ESTUDIO DE PRECISIÓN Y RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN.

Esta sección se van a introducir y discutir los diferentes métodos, algoritmos y criterios estadísticos utilizados en el simulador para analizar y mejorar la precisión de un sistema de multilateración.

4.1. Parámetros de rendimiento

4.1.1 CRLB

El CRLB o cota inferior de Crammér-Rao, se basa en un enfoque estadístico para determinar una cota inferior para la varianza de un estimador no sesgado [9]. En el simulador se utiliza este criterio para calcular la precisión teórica esperada tanto verticalmente como horizontalmente analizando, a partir de esta cota inferior, las varianzas que pueden presentarse en las mediciones del tiempo de llegada (TOA) en cada estación, que son causadas por errores instrumentales o errores causados por un bajo nivel de S/N (señal/ruido). Un bajo nivel de S/N a su vez es causado por otro tipo de errores generados tanto por fuentes internas (posición de estaciones, antenas receptoras, pérdidas en las líneas de transmisión) como externas (pérdidas en la propagación de la señal, efecto multi-camino, pérdidas en el transpondedor). Los errores en las mediciones aumentan las desviaciones típicas producidas en los TDOA's y estos hacen que el "espesor" de los hiperboloides sea mayor de manera que su intersección provoca una mayor zona de incertidumbre para la posición estimada de la aeronave.

En el programa podemos realizar el estudio de precisión teórica esperada de dos maneras: estudio por trayectoria o por área. En el estudio por trayecto se aplica el cálculo de la CRLB a un trayecto o un conjunto de trayectos, para poder ver la precisión en las posiciones del trayecto en una gráfica. La figura 19 muestra un ejemplo de la trayectoria de despegue de una aeronave en el aeropuerto de Innsbruck en Austria.

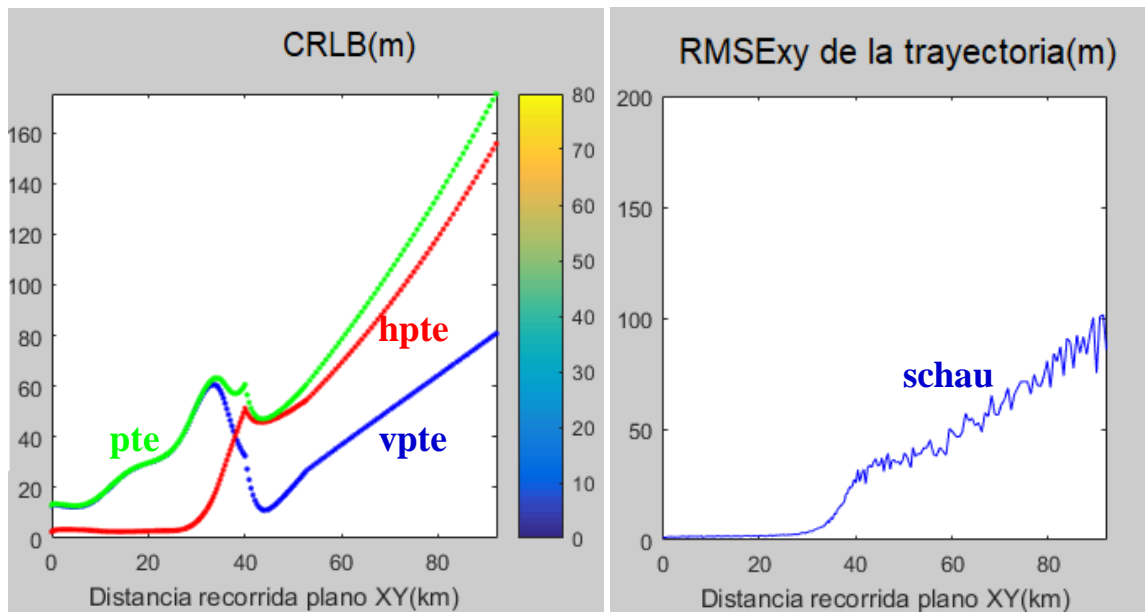


Figura 18. CRLB con RMS de una trayectoria.

En la gráfica hpte es la precisión teórica esperada horizontal, vpte es la precisión teórica esperada vertical y pte es la precisión teórica esperada que es la raíz de las sumas cuadas de hpte y vpte. Obviamente cuanto menor sea el valor de CRLB mayor será la precisión, ya que a menor CRLB la variación del posicionamiento respecto a las posiciones reales del blanco será menor.

$$PTE = \sqrt{HPTE^2 + VPTE^2} \quad (5)$$

En esta ventana del simulador también se incluye otra gráfica que muestra el error medio cuadrático (RMS) de la trayectoria seleccionada y como se puede comprobar el crecimiento del error es proporcional al aumento del PTE.

En el estudio por área realizamos los cálculos de CRLB sobre el área introducida y veremos los resultados en una gráfica de colores. En la siguiente figura podemos ver un ejemplo del cálculo del CRLB aplicado sobre el área de el aeropuerto de Innsbruck en Austria y sus alrededores.

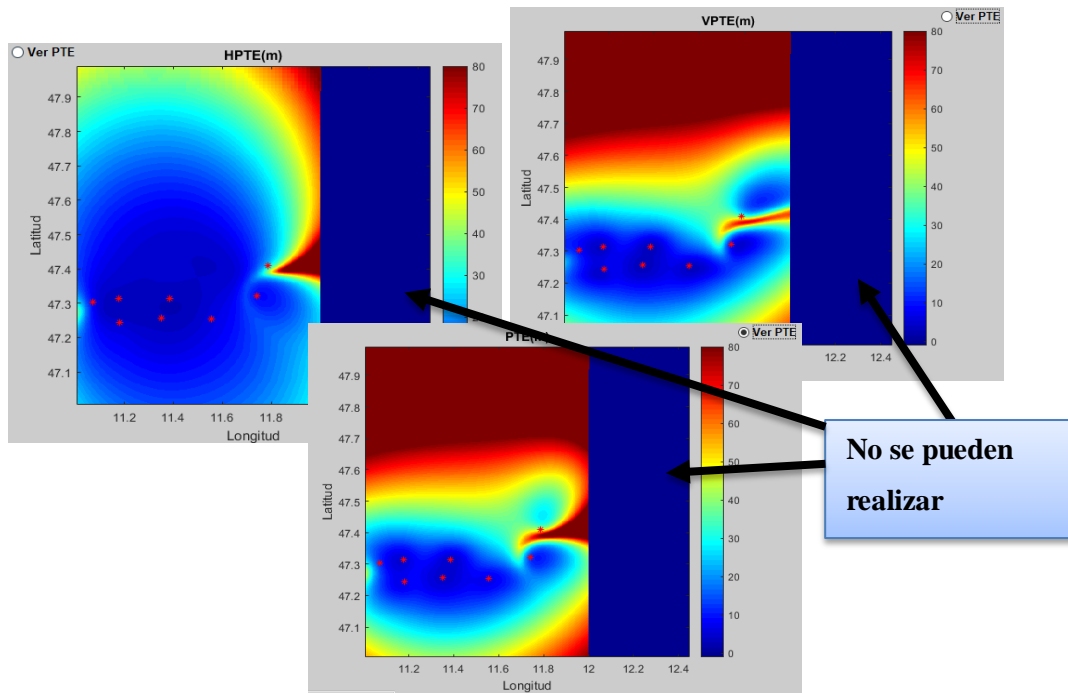


Figura 19. CRLB, área aeropuerto Innsbruck.

Como se ve en la figura muestra la precisión teórica horizontal, vertical y global que ofrece el sistema y las zonas que están en azul y señalizadas indican que el número de estaciones para realizar el cálculo es menor que cuatro, o que el número de estaciones que reciben la señal con suficiente sensibilidad es menor que cuatro. En la interfaz tenemos que introducir también ciertos parámetros como el identificador de avión, porque para realizar los cálculos utilizamos las propiedades de transmisión y entre ellas se encuentran la potencia de transmisión del transpondedor, la ganancia en la transmisión y las pérdidas, y otro parámetro que falta en las propiedades de transmisión son las pérdidas por absorción atmosférica. También se tiene que introducir la resolución, para poder ver con mayor o menor nitidez la imagen, la altura del plano (sobre el nivel del mar) a la que queremos que se realice los cálculos y hay un marcador para indicar si queremos que se hagan los cálculos de la visibilidad radioeléctrica de las estaciones en cada uno de los puntos del área, para aplicarlos a la obtención del CRLB.

Cabe decir que para el cálculo de la CRLB también hay que introducir otros parámetros previamente, como la ubicación de las estaciones, el área o el trayecto del avión. También deben definirse las propiedades de las estaciones como altura de los mástiles, ganancias, etc. Todo esto se detallará mejor más adelante en la descripción de la aplicación.

4.1.2 Número de Iteraciones de MonteCarlo

En el programa se ha utilizado una técnica para el cálculo conocida como método de MonteCarlo. Este es un método estocástico que utiliza un conjunto de algoritmos para realizar simulaciones aleatorias. MonteCarlo permite resolver problemas matemáticos añadiendo al sistema un conjunto de variables aleatorias y mediante la simulación de este sistema podemos ver su comportamiento [8]. En nuestro programa utilizamos la función 'randn' para generar números pseudo-aleatorios y lo aplicamos al siguiente código que se muestra en la figura:

```
for k=1:K
    [stationnumber,aa]=size(coord_stations);
    for kk=1:stationnumber
        %Calculo de la constante.
        constant=(4*pi/landa).^2*(kb*T0*FR(kk)*LT(kk))/(2*B*PT*GR(kk)*GTRX);

        dio=sqrt((pcoord-coord_stations(kk,:))*(pcoord-coord_stations(kk,:))');
        sigmaa(kk)=sqrt(constant*dio*c^2+(1)^2);
        TOA(kk)=1/c*dio+(1/c)*randn*sigmaa(kk);
        meas_distance=TOA*c;
        Meas_Error(k, kk, i)=TOA(kk)*c-dio;
    end
end
```

Constante de MonteCarlo.

Generador de números pseudo-aleatorios.

Figura 20. Extracto de código de la función compare_alg.

Esta figura es un extracto del código donde se muestra que 'randn' afecta al cálculo en la fórmula de la TOA en cada una de las estaciones y posteriormente afecta a la posición con que el sistema ubica al blanco. Este cálculo se realiza K veces para cada punto de la trayectoria de la aeronave, siendo K el número de iteraciones de MonteCarlo, de manera que podemos evaluar el comportamiento de una variable, en este caso la posición de la aeronave, afectada por otra variable aleatoria (el error en la medida del TOA).

Lo que se pretende hacer el método de MonteCarlo es simular un sistema lo más parecido a la realidad, donde se producen errores en las medidas de los TOA's y en el posicionamiento. Realizando K simulaciones obtenemos K resultados para cada punto de la trayectoria de la aeronave y luego haciendo la media de los K resultados en cada punto, obtenemos el cálculo de la trayectoria de la aeronave. Obviamente cuanto mayor sea K más precisa será la trayectoria calculada.

Es necesario comentar que para el cálculo de la trayectoria de la aeronave se ha utilizado dos algoritmos de posicionamiento, el algoritmo de Schau y el algoritmo de Schmidt, los cuales se explicarán en el siguiente punto.

4.2. Tracking

En esta sección se hablará sobre los algoritmos utilizados (Schau,Schmidt) para posicionar la aeronave en cada punto de la trayectoria y también del filtro de Kalman, el cual se utiliza para filtrar las trayectorias de las aeronaves obtenidas con los algoritmos y reducir sus errores, para obtener medidas más precisas.

4.2.1 Algoritmos de seguimiento utilizados

Los algoritmos utilizados en este simulador para la localización de las aeronaves son el de Schau and Robinson y el de Schmidt, los cuales son empleados dentro del método de MonteCarlo donde se realizan K cálculos para cada posición del trayecto de la aeronave, utilizando la posición de las estaciones y las distancias medias entre la aeronave y las estaciones calculadas en cada iteración. A continuación una breve resumen de su funcionamiento:

El algoritmo de Schau-Robinson se basa en el principio de intersección esférica, que establece que el rango de la distancia desde el blanco hasta cualquier estación, de posición conocida, representa geoméricamente (en ausencia de ruido en la medida) el radio de una esfera cuyo centro se encuentra el blanco. Es importante tener en cuenta que el algoritmo considera como origen del sistema de coordenadas la posición de la estación de referencia. Este algoritmo requiere al menos tres estaciones para el posicionamiento en 2D y 4 para el posicionamiento en 3D [6].

El algoritmo de Schmidt se basa en el principio de intersección de planos, el cual establece que las diferencias de los rangos de distancias entre el blanco y tres estaciones, de posiciones conocidas, proporciona una línea recta de posicionamiento, que geoméricamente representa el eje principal de una cónica (elipse, hipérbola, parábola), en cuyo foco (en ausencia de ruido en la medida) se encuentra el blanco. En este algoritmo se necesitan cuatro estaciones para la localización en 2D y cinco para la localización en 3D [6].

En el simulador los resultados obtenidos por ambos algoritmos se pueden visualizar al igual que los valores de RMSE. La siguiente imagen sería un ejemplo de los valores de RMSE obtenidos en el cálculo de una trayectoria mediante ambos algoritmos.

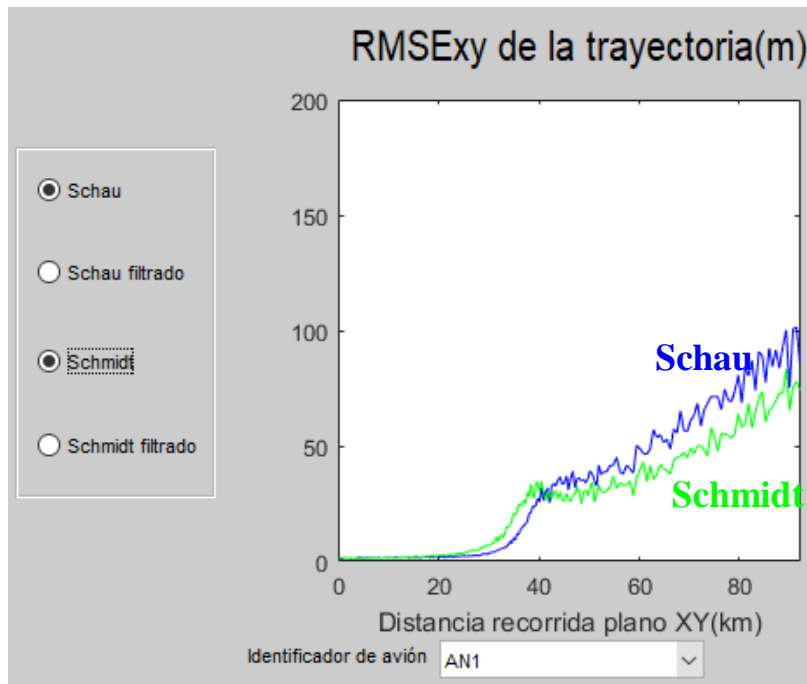


Figura 21. Ejemplo RMS algoritmos.

Como se puede ver para este caso el algoritmo de Schmidt es más eficiente que el de Schau, dado que en la mayor parte del trayecto introduce un error menor.

4.2.2 Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo óptimo de procesamiento de datos que se basa en procesar todas las mediciones para estimar el valor de las variables de interés. El filtro de Kalman minimiza los errores de los datos procesados ayudándose de información adicional que afecta al sistema. Por ejemplo la dinámica de los instrumentos de medición, la descripción estadística de los errores de medición y de la incertidumbre de los modelos dinámicos y cualquier información de las condiciones iniciales de las variables de interés.

El algoritmo tiene dos fases, una primera de predicción, seguida por otra de corrección o actualización de las variables. Primero se realiza la predicción en el estado 'i', en función del comportamiento de las variables de instantes anteriores y luego se aplica esta corrección a la variable de interés (en nuestro caso la posición de la aeronave) del estado i [3 y 4].

En nuestro algoritmo hemos tenido en cuenta estos parámetros del sistema: el CRLB (límite inferior de Cramer-Rao), las trayectorias calculadas de las aeronaves (mediante el método de MonteCarlo y los algoritmos de Schmidt y de Schau) y el tiempo de actualización del sistema.

En la figura 23 se muestra un ejemplo para comparar los resultados directos de los errores RMS, obtenidos de los algoritmos utilizados y los resultados filtrados con Kalman.

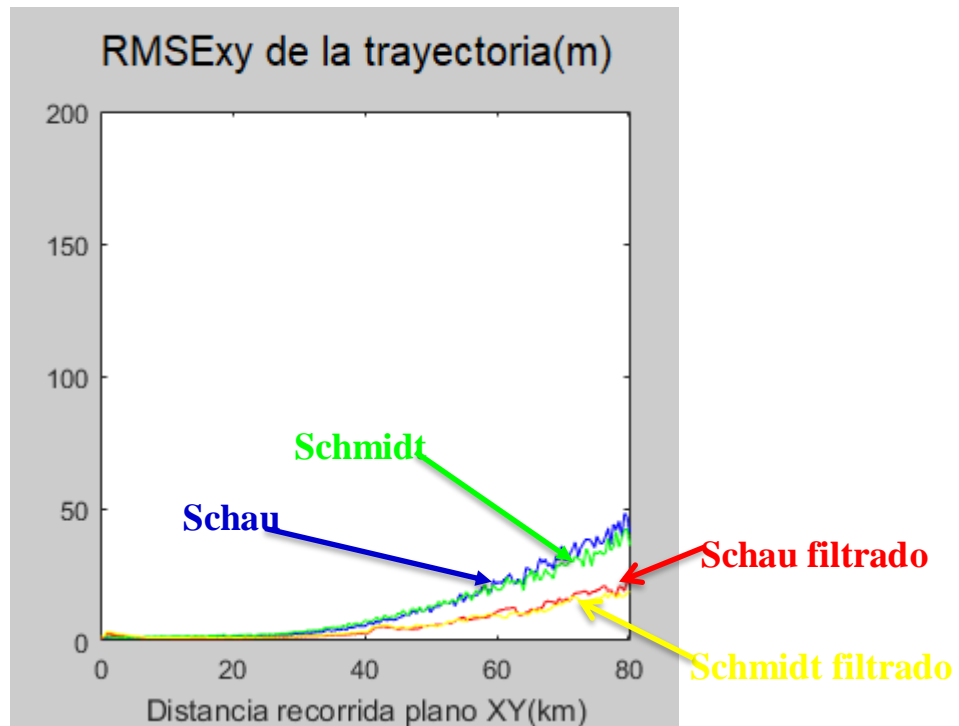


Figura 22. RMS filtrado y sin filtrar.

Podemos observar que los errores RMS para los trayectos son menores cuando utilizamos un filtro de Kalman y filtramos los resultados obtenidos en los algoritmos.

También hay que decir que el filtro de Kalman implementado en nuestro simulador no es óptimo, ya que introduce errores en las posiciones cuando la aeronave gira, realiza una maniobra o incrementa bruscamente la velocidad. Esto es debido a que el filtro de Kalman realiza las predicciones en base al comportamiento de las variables y cuando la aeronave gira cambia de rumbo y al igual las velocidades y aceleraciones en las componentes X, Y, Z.

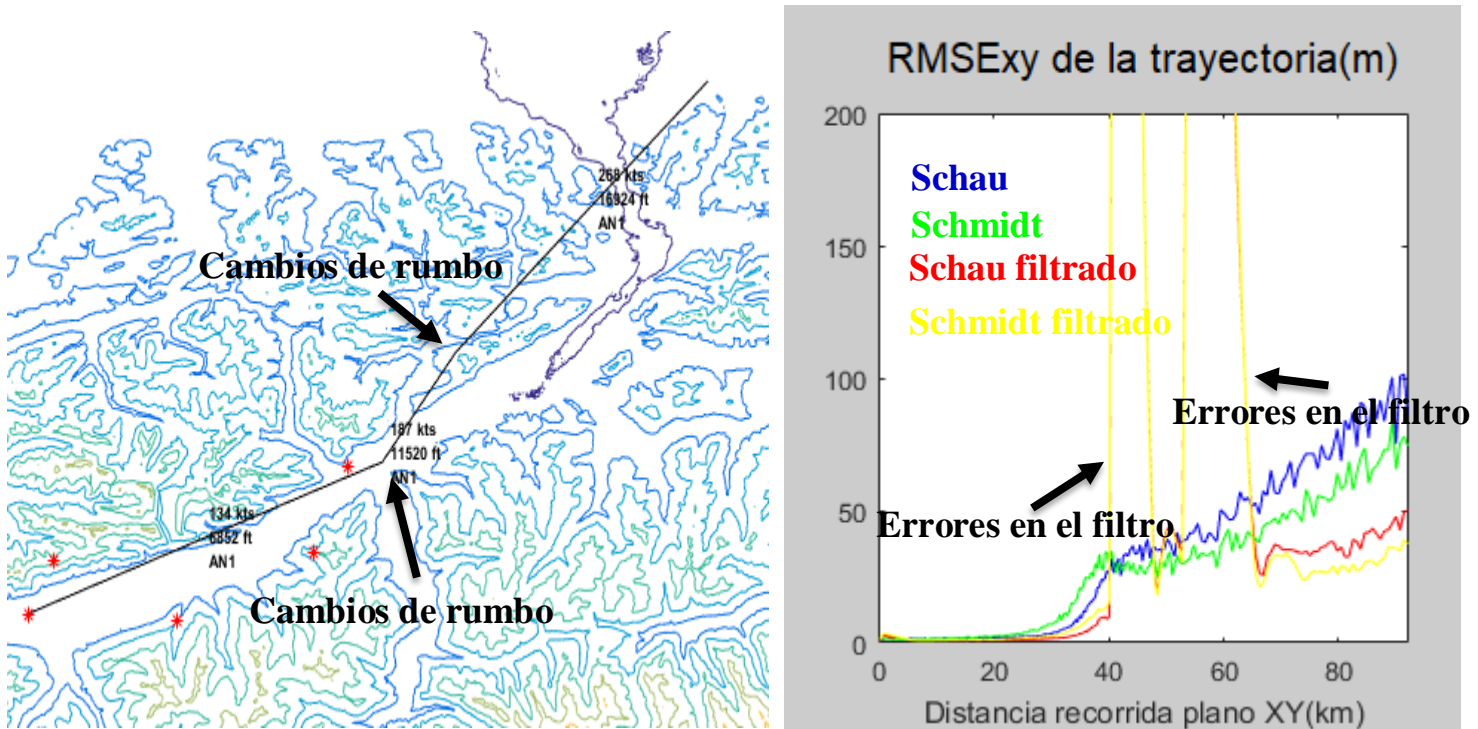


Figura 23. RMS, Errores en el filtro de Kalman.

Como se puede ver los giros en la trayectoria corresponden a los errores en el filtro.

Solo la implementación de un filtro de Kalman óptimo correspondería a otro proyecto más extenso y no introduciría estos errores. Hemos decidido utilizar nuestro filtro de Kalman ya que podemos obtener resultados coherentes al sistema aplicado, al igual que es una técnica muy utilizada en seguimiento de aeronaves y que también tiene muchas más aplicaciones.

5. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA.

En esta sección se hará una descripción de la aplicación programada con Matlab, este punto se dividirá en dos partes, primera introducción de datos por el usuario y segunda estudio. No profundizaremos en cómo usar la aplicación, ya que en el anexo se proporcionará un sencillo manual de la aplicación. Esta herramienta sigue el esquema de la figura siguiente:

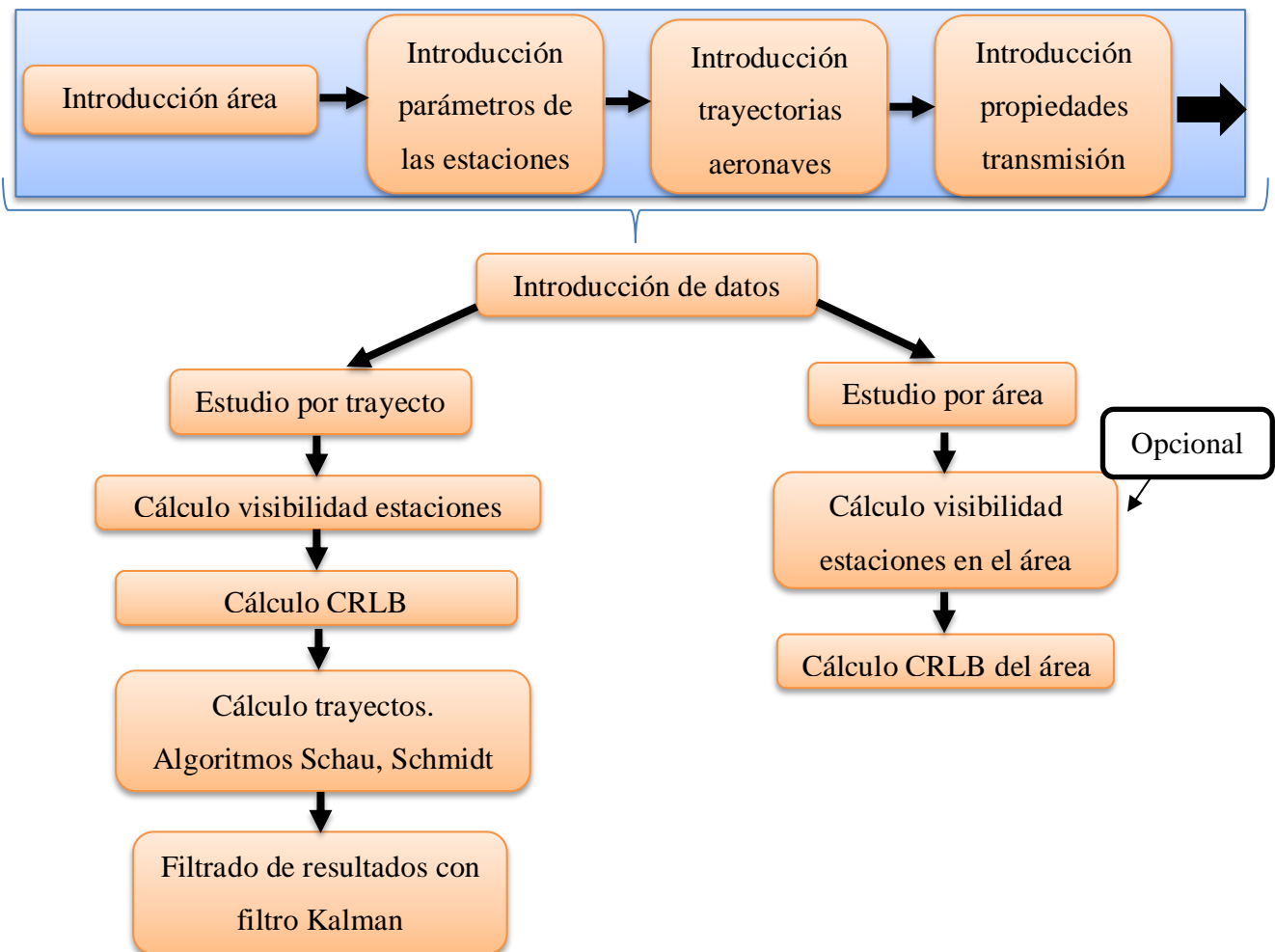


Figura 24. Esquema de la herramienta.

5.1. Introducción de datos

5.1.1 Introducción Área

Lo primero que hay que hacer en el simulador es introducir el área donde se realizarán los cálculos, en esta área estarán situadas las estaciones receptoras y los trayectos de los aviones. Se deberá introducir en concreto la latitud mínima y máxima así como la longitud mínima y máxima en coordenadas centesimales o sexagesimales.

5.1.2 Introducción parámetros de las estaciones

En este punto hay dos partes: la introducción de las coordenadas (latitud, longitud, altura barométrica) y el número de estaciones. Con esta primera parte construiremos la geometría en la posición de las estaciones. La segunda parte será introducir las propiedades de las estaciones que se consideraran para realizar los cálculos, estas son: altura de los mástiles de las antenas (m), ganancia en recepción (dB), pérdidas en el receptor (dB), ganancia del amplificador de la antena (dB), factor de ruido en el receptor (dB), sensibilidad en el receptor (dBm), margen sobre la sensibilidad (dB), error instrumental en el receptor (s), temperatura de referencia (K) y ancho de banda en el receptor (Hz).

5.1.3 Introducción trayectorias de las aeronaves.

En esta parte el usuario tiene que introducir una o más trayectorias reales para realizar los cálculos posteriores, ya que la función del programa es simular un sistema de multilateración y dependiendo de sus parámetros, algoritmos y filtros utilizados podrá realizar aproximaciones más precisas a las trayectorias introducidas.

Se pueden introducir trayectorias de tres maneras que se explicarán en el manual de usuario en el anexo. Según el método utilizado se utilizará una función diferente para calcular las trayectorias en coordenadas geográficas: método uno: *'trayectoria_2DIM'*, método dos: *'trayectoria_2D'* y método tres: *'trayectoria_2Dt'*.

5.1.4 Introducción propiedades de la transmisión.

Para este punto se deben de introducir unos parámetros que influyen en la transmisión de los mensajes desde la aeronave hasta la recepción de este mensaje en las estaciones receptoras.

Los parámetros son: potencia de transmisión (dBm), ganancia de transmisión (dB), pérdidas en el transmisor (dB) y pérdidas por absorción atmosférica (dB/km).

5.2. Realización de cálculos y estudio

Una vez cargados todos los datos pasamos al cálculo y obtención de resultados, estos cálculos pueden realizarse por trayectos o por área.

5.2.1 Estudio por trayecto.

Para realizar los cálculos en este estudio se necesitará el valor de la constante de MonteCarlo (número de iteraciones). Una vez introducida, se realizarán los cálculos posteriores como se indica en el esquema de la figura 25.

5.2.1.1 Cálculo de la visibilidad radioeléctrica de las estaciones.

En este bloque se calculará para cada punto de la trayectoria del avión el número de estaciones que tiene visibilidad radioeléctrica con el transpondedor del avión y se almacenará en un vector. La función utilizada para este punto es '*Estvis*'.

5.2.1.2 Cálculo de la CRLB.

Después de obtener el vector con el número de estaciones con visibilidad, este se utilizará para calcular la CRLB en cada punto de la trayectoria del avión. Primero se utilizará la función '*trayectoria_xy*', para obtener las trayectorias reales de las aeronaves en coordenadas UTM (X, Y, Z), para poder trabajar con ellas. Luego mediante la función '*pte_tdoa_1*' se obtendrá para las trayectorias en UTM la PTE, HPTE y VPTE, que son la precisión teórica esperada global, horizontal y vertical respectivamente, descritas en el punto 4.1.1.

5.2.1.3 Cálculo de trayectos con los algoritmos.

Para el cálculo de los trayectos mediante multilateración se utiliza el algoritmo '*compare_alg*', en el cual aplicando el método de MonteCarlo explicado en el punto 4.1.2 se realizan K iteraciones para cada punto en la trayectoria y empleando los algoritmos de Schau y Schmidt se obtiene un vector de posiciones para cada algoritmo de dimensiones $Número_puntos_trayecto \times K \times 3$. K significa el número de simulaciones en cada punto y tres se refiere a las coordenadas X, Y, Z. Esta función también realiza el cálculo del RMSE de los vectores obtenidos y obtiene un trayecto del avión para los algoritmos de Schau y Schmidt, realizando un promediado para las K iteraciones en cada punto, obteniendo un vector para cada algoritmo de dimensiones $Número_puntos_trayecto \times 3$.

5.2.1.4 Filtrado de resultados.

En este punto se utilizan los dos vectores de dimensiones $Número_puntos_trayecto \times K \times 3$ obtenidos en el punto anterior para filtrarlos con un filtro de Kalman. También se utilizan para el filtro los valores obtenidos de la CRLB y el tiempo de actualización, como se explica en el punto 4.2.2.

La función que realiza los cálculos en este punto se llama *'filtrado_kalman'*, en la cual se obtienen 2 vectores de tamaño $Número_puntos_trayecto \times K \times 3$, para calcular con ellos el RMSE y como en el apartado anterior mediante un promediado de las K iteraciones en cada punto, se obtienen dos vectores de tamaño $Número_puntos_trayecto \times 3$, que serán las trayectorias calculadas con Schau y Schmidt filtradas por Kalman.

5.2.1.5 Visualización de resultados.

Una vez obtenidos todos los resultados podemos visualizarlos para su estudio. Existen tres opciones:

- Visualizar los resultados de la CRLB y RMSE para cada trayecto.

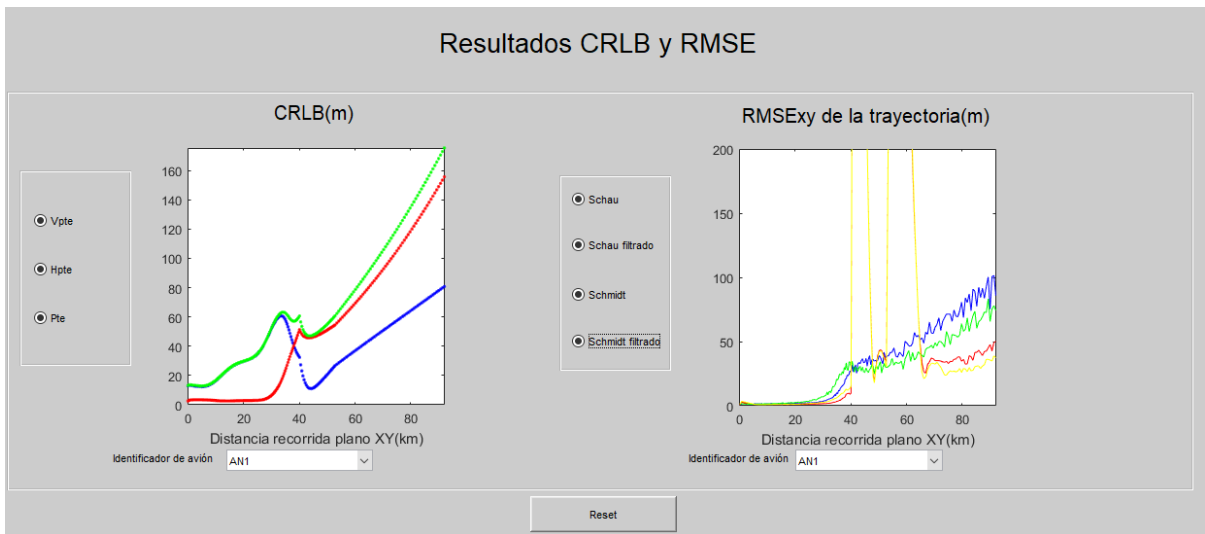


Figura 25. Visualizar CRLB y RMSE.

- Visualizar los trayectos reales de las aeronaves sobre el mapa.

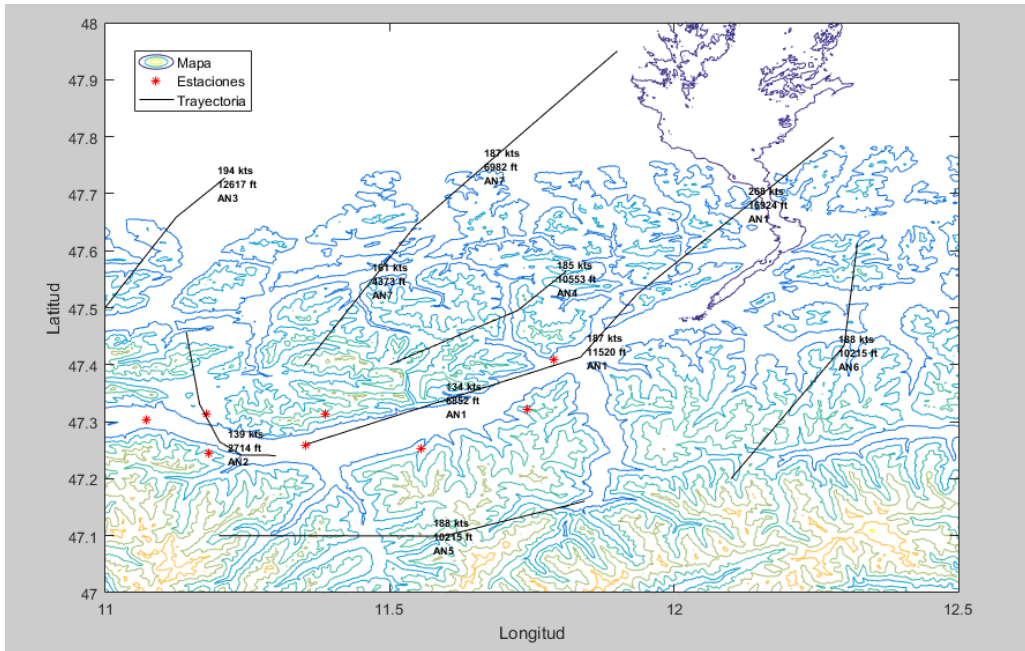


Figura 26. Aeropuerto Innsbruck, 7 trayectorias.

Para visualizar los mapas en la interfaz se emplea un función llamada ‘*gráfico mapa*’, esta función a su vez emplea otra función llamada ‘*dibujarmapa*’, que es la que se emplea para cargar los mapas y mostrarlos junto con las estaciones y los trayectos.

La función ‘*dibujarmapa*’ emplea una sub-función para cargar los mapas que dependen de las coordenadas introducidas por el usuario (latitud mínima y máxima, longitud mínima y máxima). Esta sub-función se llama ‘*readhgt*’ e importa o descarga archivos de datos SRTM de la NASA en formato .HGT. Primero busca en el directorio si se encuentra los archivos SRTM y en caso negativo los descarga de un servidor de datos USGS, para lo cual se necesita conexión a internet.

- Visualizar los resultados de las trayectorias calculadas.

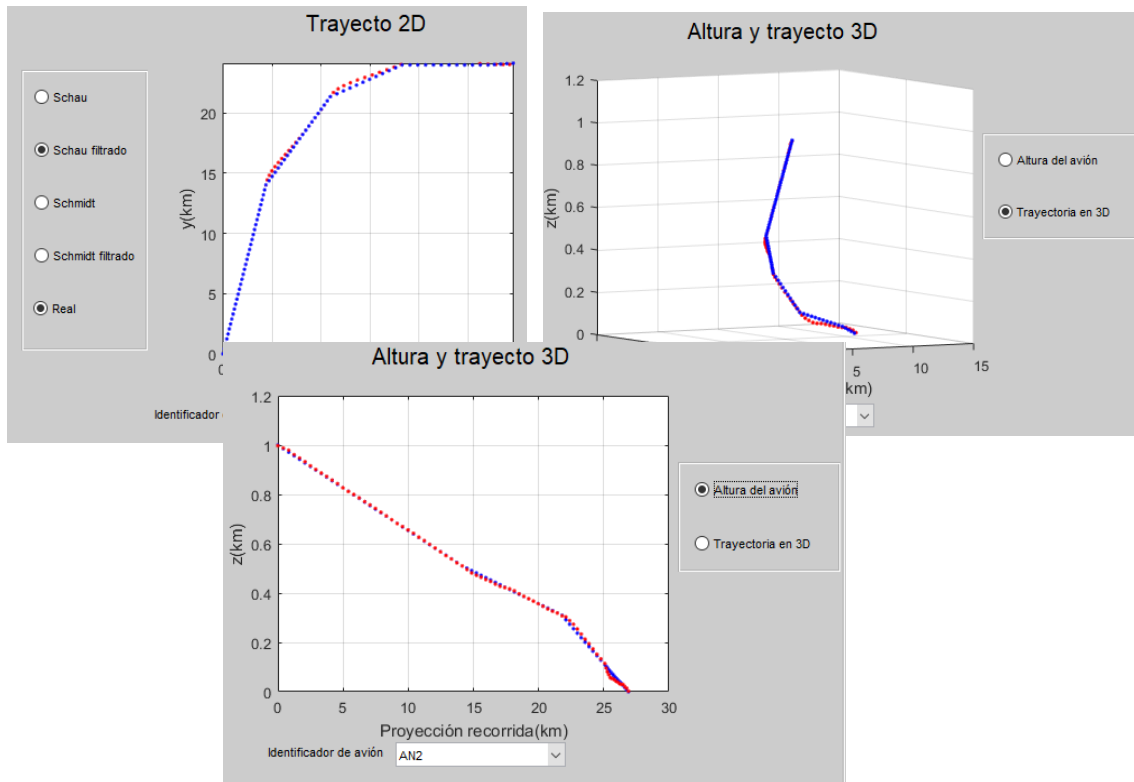


Figura 27. Trayectos 2D,3D y su altura

5.2.2 Estudio por área.

Para el estudio por área los pasos a seguir son introducir el identificador del avión, para que usemos las propiedades del transpondedor del avión elegido y además las pérdidas de absorción atmosférica. También debemos introducir la altura del plano (altura barométrica) a la que se quiere realizar el cálculo, seleccionar si queremos que considere o no el cálculo de la visibilidad radioeléctrica de las estaciones sobre todos los puntos del área y finalmente seleccionar el nivel de resolución que queremos tener en la imagen.

Los pasos que sigue el programa para realizar los cálculos son los expresados en la figura 25: primero se calcula (si el usuario quiere) la visibilidad radioeléctrica de las estaciones con el programa 'Estvis_area' y obtenemos un vector de tamaño $N \times N$, que muestra el número de estaciones que tienen visibilidad en cada punto; a continuación, calcula el CRLB (explicación de CRLB más detallada en el punto 4.1.1) para toda el área seleccionada con el programa 'pte_tdoa_area', proporcionando tres vectores HPTE, VPTE y PTE de tamaños $N \times N$.

La figura 29 muestra una imagen de su interfaz con un ejemplo:

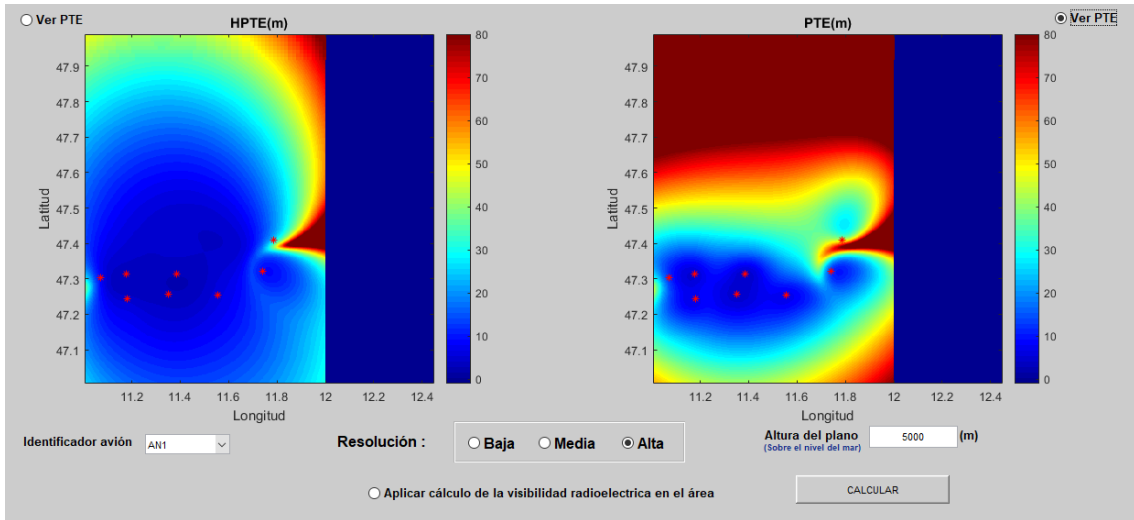


Figura 28. Interfaz de resultados CRLB en el estudio por área.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

6.1 Introducción a los análisis y resultados.

En esta parte vamos a realizar un estudio de las propiedades que pueden afectar a la capacidad del sistema de multilateración y de todas ellas vamos a destacar las que tienen más relevancia. Realizaremos el estudio basándonos sobre todo en el cálculo del CRLB en el área de aplicación, ya que con este método podemos ver resultados más significativos.

También realizaremos un estudio sobre la efectividad de los algoritmos de posicionamiento que se han empleado en el simulador, utilizaremos el estudio por trayecto para poder comparar los resultados que obtendremos de ambos y realizar un análisis.

Utilizaremos diferentes estaciones de aeropuertos utilizados en la actualidad, situadas en entornos montañosos y planos, para ver como varían los resultados.

Estudio de las Propiedades:

De los datos introducidos por el sistema que vamos a estudiar, los vamos a dividir en cuatro secciones y estudios diferentes:

1. Estudio del parámetro altura del mástil: analizaremos si el aumentar las alturas de los mástiles afecta de manera importante a la cobertura que puede aportar el sistema mediante al cálculo del CRLB, ya que al aumentar la altura del mástil cabe esperar que aumente cobertura por visión radioeléctrica de las estaciones.
2. Estudio del error instrumental en el receptor y cómo este afecta directamente a la precisión del sistema.
3. Estudio de los parámetros que afectan al nivel de señal recibida: ganancia en recepción, pérdidas en recepción, ganancia del amplificador de la antena, factor de ruido, sensibilidad del receptor y margen sobre la sensibilidad. Analizaremos estos parámetros para obtener un nivel de señal en las estaciones receptoras suficiente para calcular los tiempos de llegada.
4. Estudio de la geometría de las estaciones mediante el número de estaciones y su posicionamiento, para comprobar cómo afectan a la visibilidad radioeléctrica de las estaciones y a la precisión del sistema.

Estudio de los algoritmos:

Para realizar el estudio de los algoritmos nos basaremos sobre todo en los resultados obtenidos de las gráficas del RMSE para definir cuál de los dos algoritmos es más eficiente, según que circunstancias y sacaremos conclusiones de las gráficas obtenidas de la CRLB y de los trayectos.

Finalmente, a continuación de estos estudios se presentará un ejemplo utilizando el filtro de Kalman para ver su utilidad en estas aplicaciones.

6.2 Estudio de las propiedades

6.2.1 Estudio del parámetro altura del mástil.

Utilizaremos la tabla siguiente de referencia para las propiedades de las estaciones y propiedades de transmisión y lo que iremos variando será la altura del mástil a la vez que analizaremos diferentes entornos donde ubicaremos las estaciones.

Propiedades estaciones:

Altura mástil de la antena. h= 0 m	Ganancia de recepción. GR= 0 dB	Pérdidas en recepción. LR= 3 dB	Ganancia de amplificación. GA= 10 dB	Factor de Ruido. FR= 0 dB
Sensibilidad en el receptor. Sens= -85dBm	Margen sobre la sensibilidad. M= 0dB	Error instrumental en el receptor. sigma_inst= 8.00e-09 s	Temperatura de trabajo. T0= 290K	Ancho de banda en el receptor. B=20MHz.

Propiedades en la transmisión:

Potencia en la transmisión: PT= 57 dBm	Ganancia en la transmisión. GTRX=0 dB	Pérdidas en el transmisor. LTRX= 2 dB	Pérdidas por absorción atmosférica. Alpha= 0 dB/km
--	---	---	--

Tabla 1. Datos de referencia

La altura del mástil de las antenas sirve para mejorar la visibilidad radioeléctrica y mejorar la cobertura y esto se puede comprobar mejor en terrenos montañosos donde la visibilidad es más reducida. Aquí un ejemplo de una zona montañosa con diferentes longitudes del mástil de la antena:

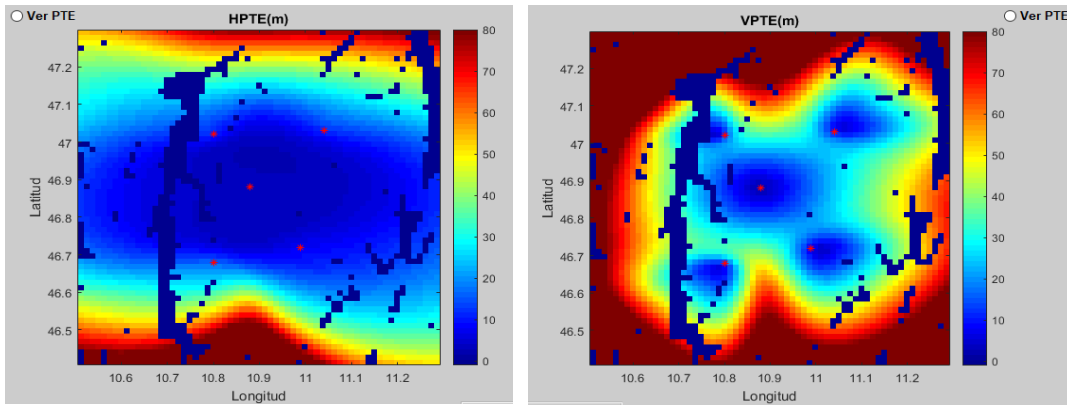


Figura 29. CRLB en terreno montañoso, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 15 metros de mástil.

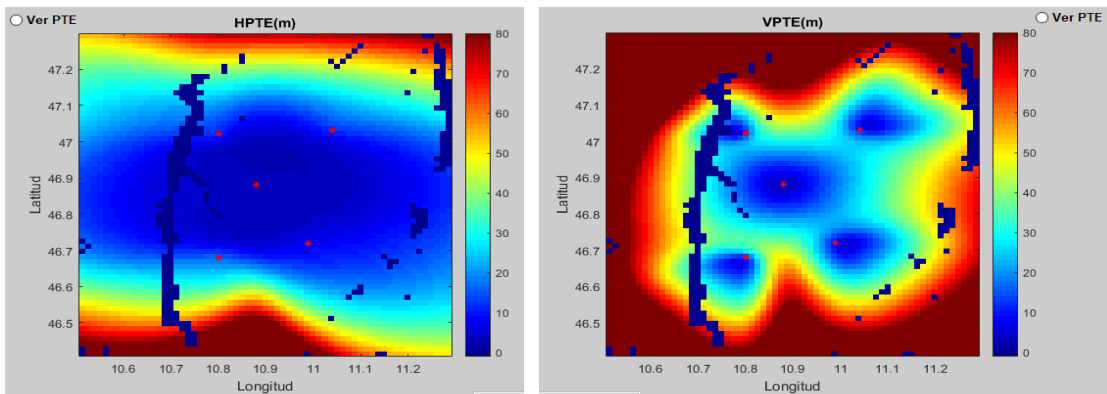


Figura 30. CRLB en terreno montañoso, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia.

Como se puede ver al aumentar la altura del mástil han disminuido los puntos azules oscuros que indican que no hay visión radioeléctrica, en cambio la cobertura que puede proporcionar el sistema no ha variado. Hemos elegido una zona especial para apreciar la diferencia al aumentar la zona del mástil.

A continuación dos ejemplos más:

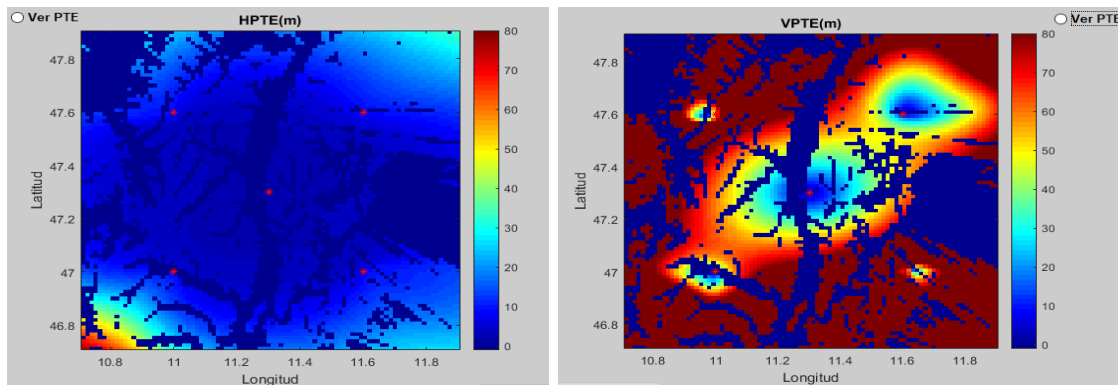


Figura 31. CRLB en terreno montañoso, escenario 2, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 15 metros al mástil.

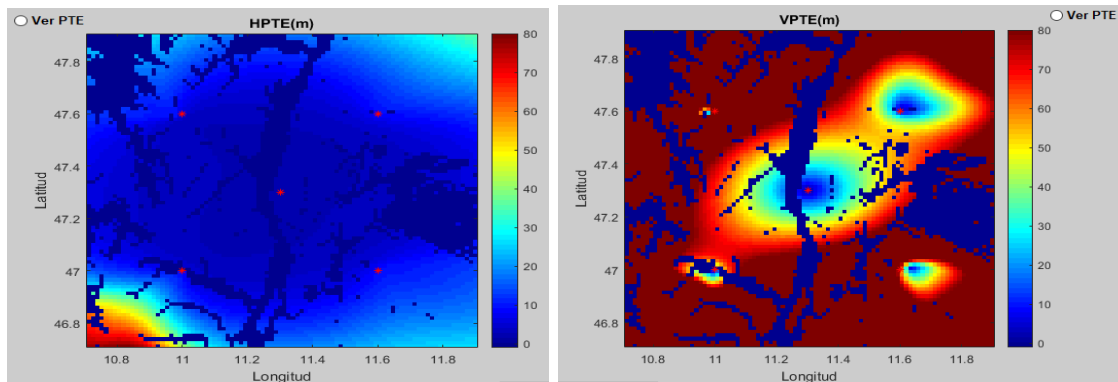


Figura 32. CRLB en terreno montañoso, escenario 2, a 1000 metros de altura sobre el mar, utilizando los datos de referencia.

Se repite el caso anterior, al aumentar la longitud el mástil se reducen los puntos sin visión radioeléctrica, pero la cobertura no aumenta.

A parte de este escenario hemos estudiado otros con áreas más extensas y con terreno montañoso pero no hemos sacado resultados significativos al aumentar la altura de los mástiles, también hemos utilizado áreas planas para posicionar las estaciones, pero los mástiles no han aportado mucha diferencia en este último estudio.

Con estos resultados obtenidos podemos concluir que las alturas de los mástiles de las antenas son un parámetro importante en un sistema de multilateración, debido a que en situaciones donde tenemos obstáculos cercanos a las antenas estos pueden ser de gran ayuda para mejorar la visión radioeléctrica y su cobertura, además de que su coste no es elevado en comparación con todos los elementos que emplea este tipo de sistemas de posicionamiento. Con todo lo anterior dicho, hay

que mencionar que no es el parámetro más importante que veremos ni el que marca la más la diferencia, pero es de gran ayuda en algunas situaciones.

6.2.2 Estudio del error instrumental en el receptor.

El error instrumental es un parámetro que afecta al cálculo del TOA directamente y por lo tanto varía la precisión del sistema. Este parámetro depende del fabricante y vamos a estudiar lo importante que es invertir en la calidad del sistema para tener un error instrumental reducido.

Para estudiar más profundamente esta propiedad utilizaremos un escenario libre de obstáculos, para no tener influencias en la visión radioeléctrica. Este escenario será el aeropuerto de Londres, Heathrow, el cual tiene una superficie bastante plana y está situado unos 20-25 metros por encima del nivel del mar. Las propiedades de referencia que hemos usado serán las de la Tabla 1. Observemos aquí tres ejemplos:

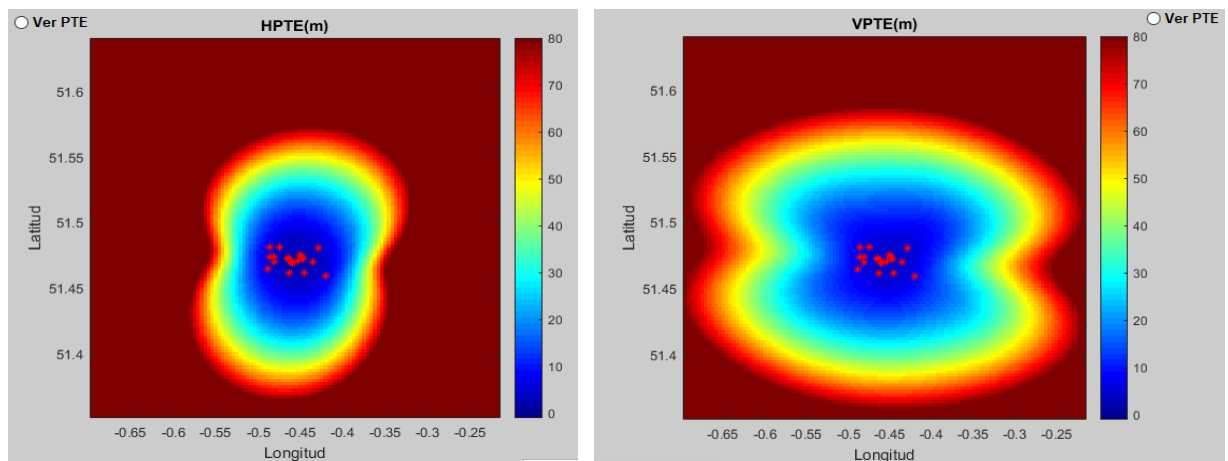


Figura 33. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia.

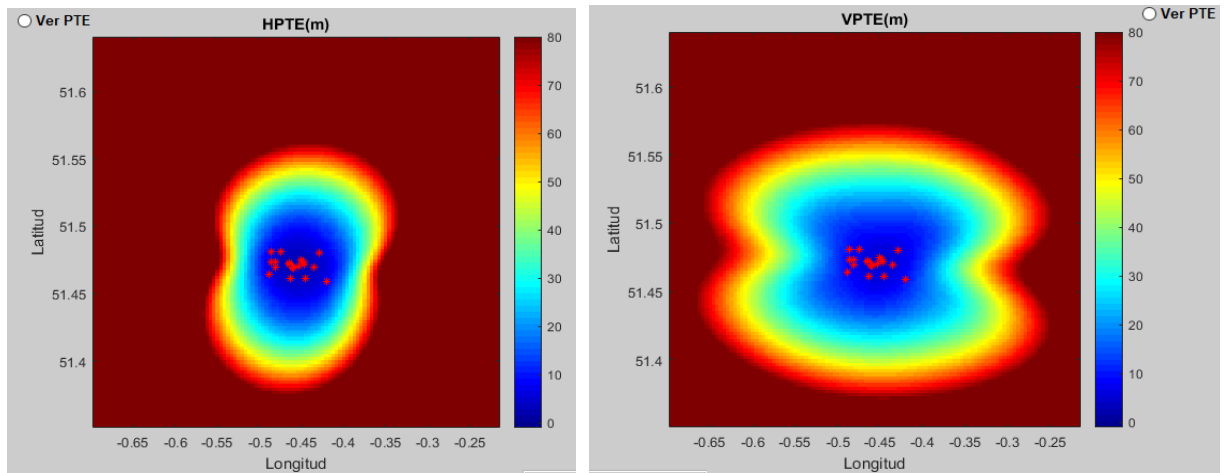


Figura 34. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 2 ns al error instrumental(10ns).

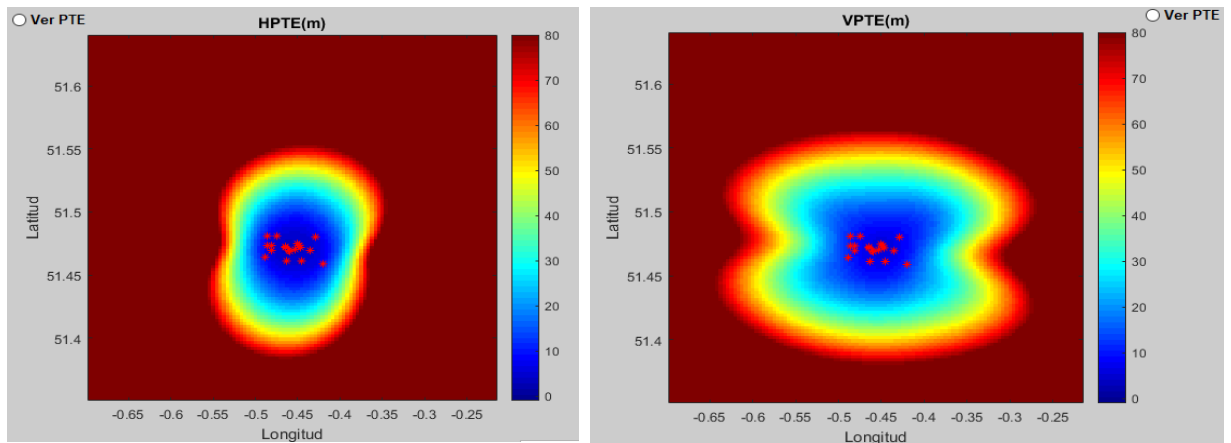


Figura 35. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 m sobre el nivel del mar, utilizando los datos de referencia y añadiendo 4 ns al error instrumental(12ns).

Como se puede verificar al aumentar el error instrumental en apenas 2 ns, ya se puede ver que la precisión en el área de cobertura disminuye y con 4 ns aún se nota más la diferencia, de manera que podemos decir que el error instrumental es un parámetro muy importante a considerar y que influye de manera directa en la calidad del sistema, ya que no depende de otros factores ni de los escenarios de aplicación.

Por lo tanto los sistemas de multilateración requieren de herramientas de muy alta precisión para la medición de los TOA's, para que los errores que puedan aparecer en el cálculo de los TDOA's sean mínimos y así poder realizar un posicionamiento adecuado de las aeronaves.

6.2.3 Estudio de los parámetros que afectan al nivel de señal recibida.

En esta parte los parámetros que se van a estudiar pueden influir en dos aspectos, en el alcance máximo del sistema y en la SNR que afecta a la precisión del TOA. Vamos a estudiar cada uno de estos aspectos por separado y utilizaremos como escenario el aeropuerto de Londres, Heathrow ya que dispone de un área libre de obstáculos. En el simulador para calcular el nivel de señal recibido hemos considerado a siguiente fórmula:

$$\text{Nivel de señal}(dB) = PR - Sens - M \quad (5)$$

$$PR = PT - LTRX - LRCX + GARCX + GTRX + GRCX - A0 - Lat \quad (6)$$

PR:Potencia Recibida	Sens: Sensibilidad	M:Margen sobre la sensibilidad	LTRX: Pérdidas en el transmisor	LRCX: Pérdidas en el receptor
GARCX: Ganancia de amplificador de la antena de recepción	GTRX: Ganancia de transmisión	GRXC: Ganancia de recepción	A0: Atenuación en la propagación	Lat: Pérdidas por absorción atmosférica.

Como se puede ver cada uno de estos parámetros contribuyen de manera igual al cálculo del nivel de señal así que vamos a modificar uno de ellos y ver que cambios introduce en el sistema.

Propiedades estaciones:

Altura mástil de la antena. h= 3 m	Ganancia de recepción. GR= 0 dB	Pérdidas en recepción. LR= 3 dB	Ganancia de amplificación. GA= 10 dB	Factor de Ruido. FR= 1 dB
Sensibilidad en el receptor. Sens= -85dBm	Margen sobre la sensibilidad. M= 0dB	Error instrumental en el receptor. sigma_inst= 6.00e-09 s	Temperatura de trabajo. T0= 290K	Ancho de banda en el receptor. B=20MHz.

Propiedades en la transmisión:

Potencia en la transmisión: PT= 57 dBm	Ganancia en la transmisión. GTRX=0 dB	Pérdidas en el transmisor. LTRX= 2 dB	Pérdidas por absorción atmosférica. Alpha= 0 dB/km
--	---	---	--

Tabla 2. Datos de referencia, segundo modelo

Elegimos pues las pérdidas en recepción y utilizaremos las propiedades de referencia de la tabla 2. Aquí vemos unos ejemplos al modificar el parámetro dicho.

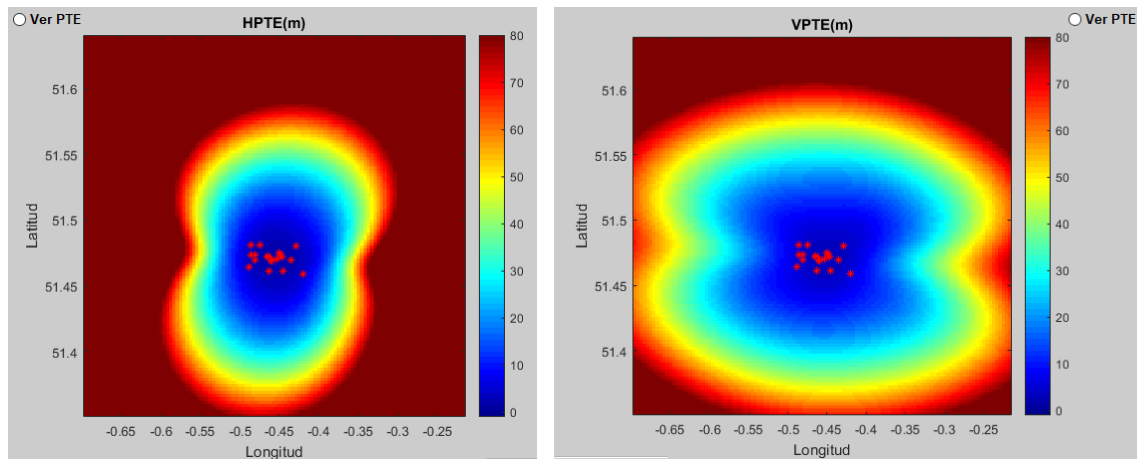


Figura 36. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2.

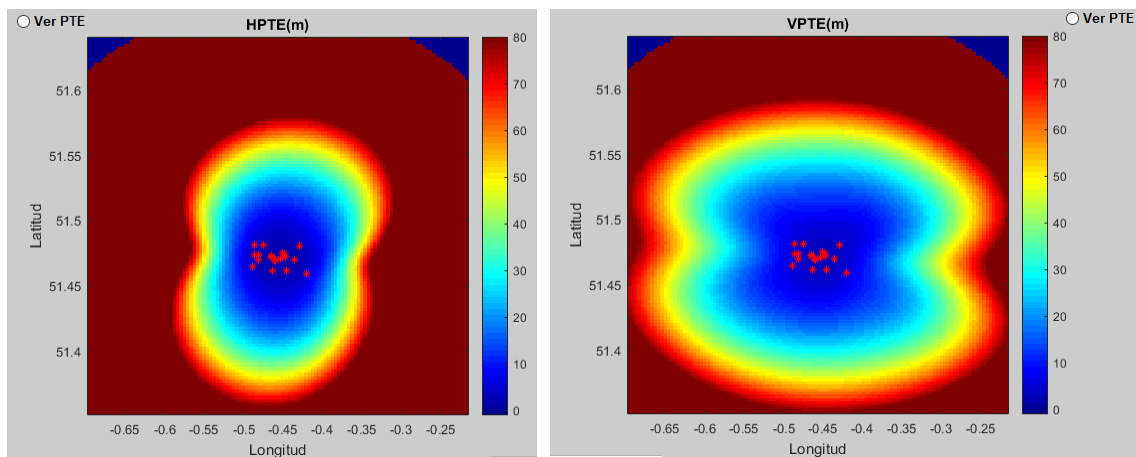


Figura 37. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2, añadiendo 27 dB a las pérdidas de recepción(30dB).

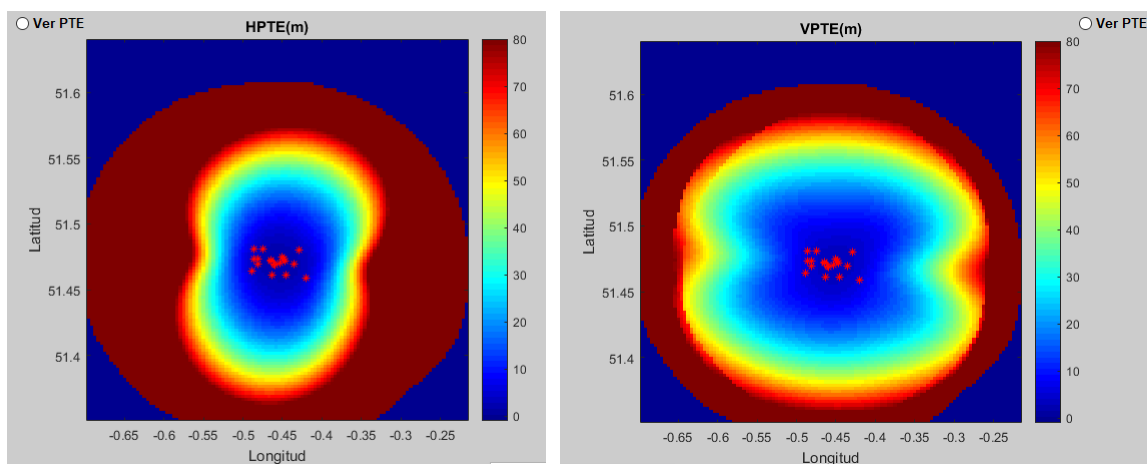


Figura 38. CRLB en el aeropuerto Heathrow, a 2000 metros de altura sobre el nivel del mar y utilizando propiedades tabla 2 añadiendo 30 dB a las pérdidas de recepción(33dB).

Como se puede comprobar hasta que no hemos aumentado las pérdidas en 30 dB respecto al sistema inicial (figura 38), no se han producido apenas resultados, la precisión es un poco menor y se empiezan a ver puntos en azul, en los que el sistema no le llega suficiente señal para calcular su posición. Cuando aumentamos en 30 dB las pérdidas respecto a la primera configuración en la figura 39, ya se puede ver que el sistema ha perdido más alcance y la precisión en el área se ha reducido un poco más.

Hemos realizado otras pruebas al aumentar ganancia o reducir la sensibilidad y en todas ellas hemos obtenido prácticamente el mismo resultado que en la configuración inicial (figura 37). También hemos aumentado la figura de ruido, que afecta solamente a la SNR, y solo hemos notado diferencias a partir de los 30 dB de aumento, respecto a la configuración inicial (figura 37).

La conclusión que sacamos de los parámetros en este estudio es que no son críticos para los sistemas de multilateración en los escenarios de área de terminal de maniobras, ya que hemos tenido que incrementar considerablemente los parámetros para notar cambios significativos. El CRLB no ha realizado cambios expresivos al modificar estas propiedades, debido a que el error que pueda introducir el sistema tiene más dependencia con el error instrumental, ya que este último afecta directamente y es normalmente de magnitudes mayores.

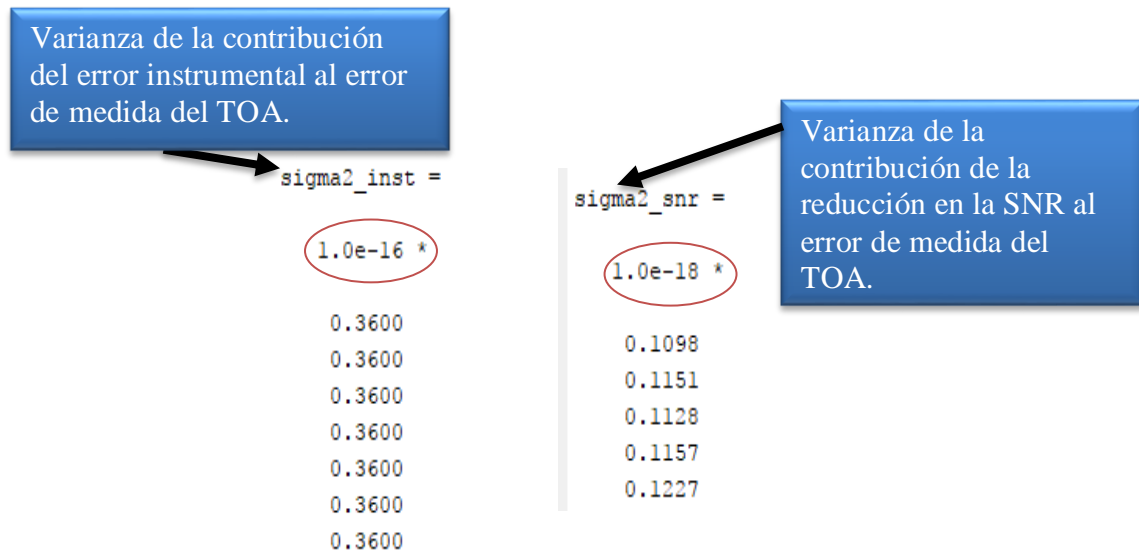


Figura 39. Comparación de la contribución del error instrumental con la de SNR, para la configuración de la tabla 2.

6.2.4 Estudio de la geometría de las estaciones.

Para este punto estudiaremos diferentes configuraciones geométricas de las estaciones, así como modificaremos el número de estaciones introducidas. Estudiaremos casos en áreas con terreno plano sin obstáculos y áreas con terreno montañoso, para ver realmente las contribuciones de la geometría en el sistema.

Para todos los siguientes resultados que vamos a mostrar nos hemos basado en las propiedades de la tabla 2.

6.2.4.1 Configuraciones de cuatro y cinco estaciones en terreno plano.

A continuación vamos a mostrar 4 modelos de geometría de estaciones: geometría cuadrada, geometría triangular con estación al medio, geometría pentagonal y geometría cuadrada con estación al medio. Hemos seleccionado Albacete como el lugar de emplazamiento para las estaciones en terreno plano.

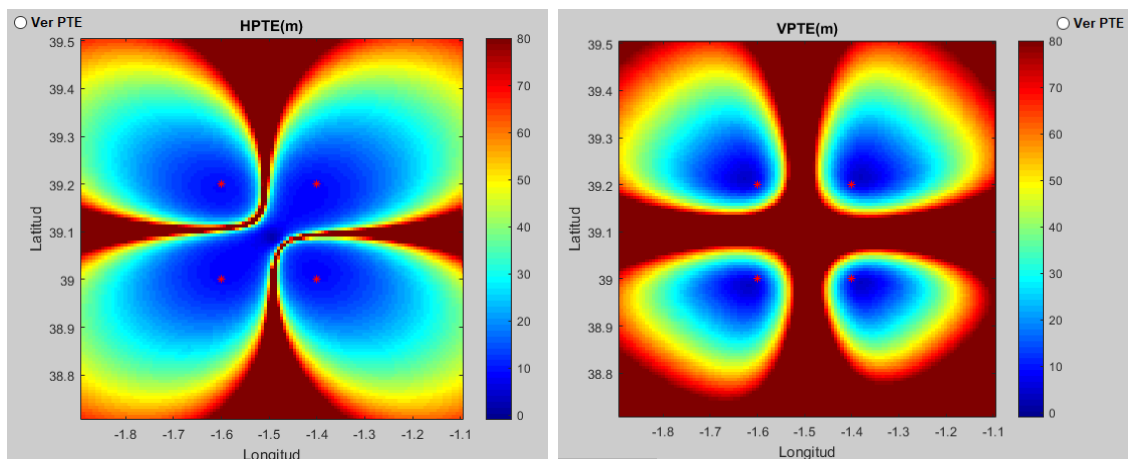


Figura 40. CRLB, geometría cuadrada, 4 estaciones, 3000 m de altitud barométrica.

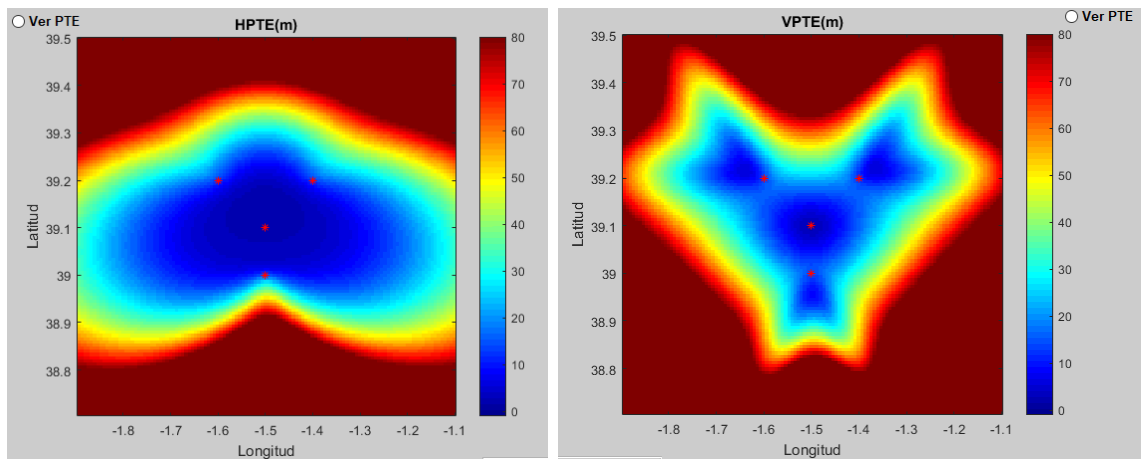


Figura 41. CRLB, geometría triangular, 4 estaciones, 3000 m altitud barométrica.

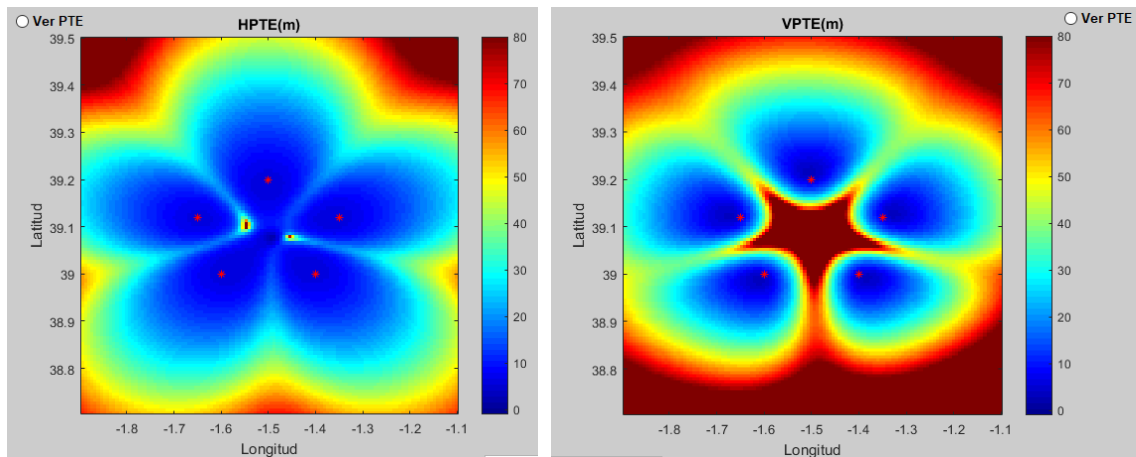


Figura 42. CRLB, geometría pentagonal, 5 estaciones, 3000 m altitud barométrica.

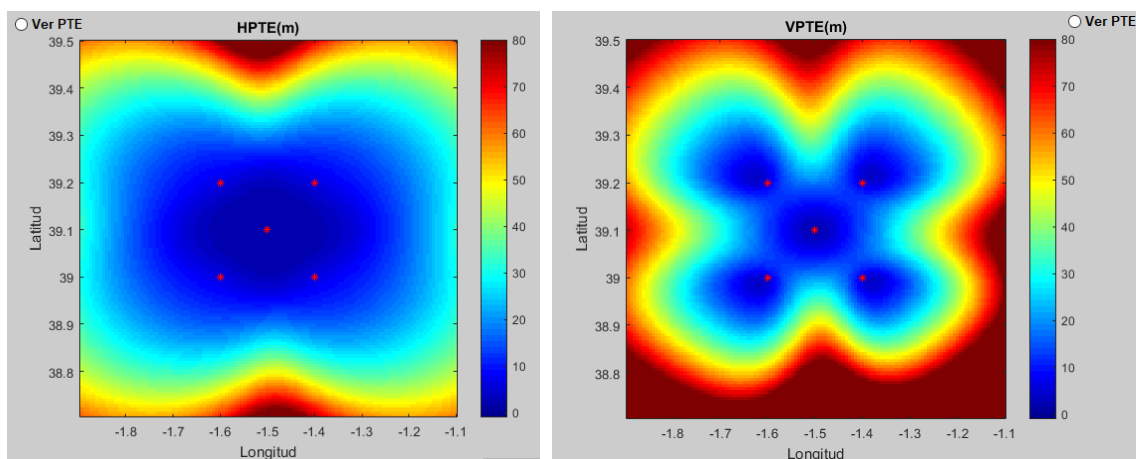


Figura 43. CRLB, geometría cuadrada, 5 estaciones, 3000 m altitud barométrica.

Observando las cuatro configuraciones se puede apreciar claramente la importancia del número de estaciones y la geometría de ellas. En los dos primeros modelos figura 41 y figura 42, para el mismo número de estaciones ve como la configuración triangular proporciona un mejor rendimiento, ya que no tiene saltos de niveles de CRLB, sobre todo en la zona central donde se encuentran las estaciones. Lo mismo le sucede a las dos distribuciones de cinco estaciones, figura 43 y 44, al añadir una estación central el sistema proporciona unos niveles de CRLB más acordes a el campo de cobertura. También se debe considerar la importancia del número de estaciones, ya que al aumentar este mejoran los niveles de CRLB en el espacio de cobertura y su capacidad de alcance.

6.2.4.2 Configuraciones de cuatro y cinco estaciones en terreno montañoso.

En esta parte vamos a utilizar las mismas configuraciones geométricas de estaciones que en el punto anterior, para ver si también se producen los mismos resultados y realizar posteriormente

un análisis. Hemos utilizado como lugar de ubicación de las estaciones una zona montaña de Austria, cerca del aeropuerto de Innsbruck.

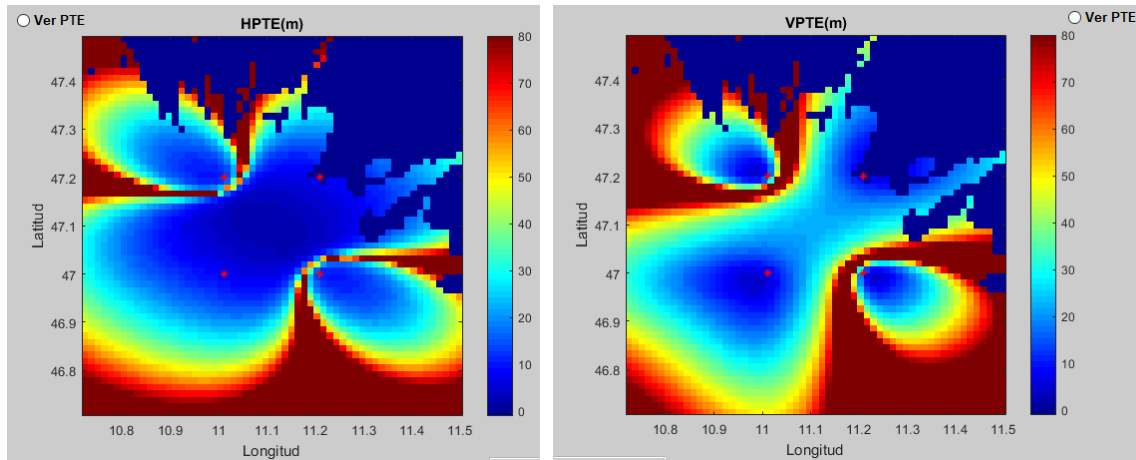


Figura 44. CRLB en zona montañosa, geometría cuadrada, 4 estaciones, 4000 m altitud barométrica.

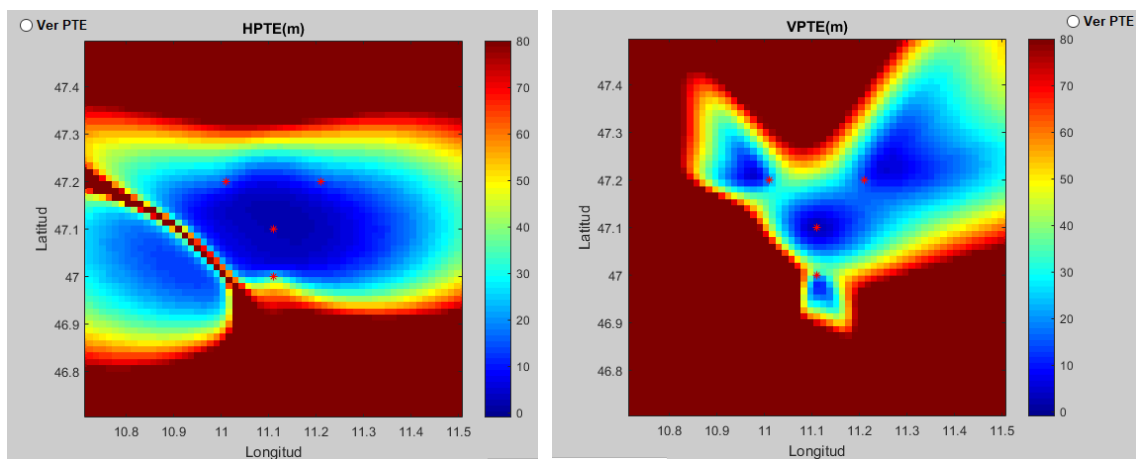


Figura 45. CRLB en zona montañosa, geometría triangular, 4 estaciones, 4000 m altitud barométrica.

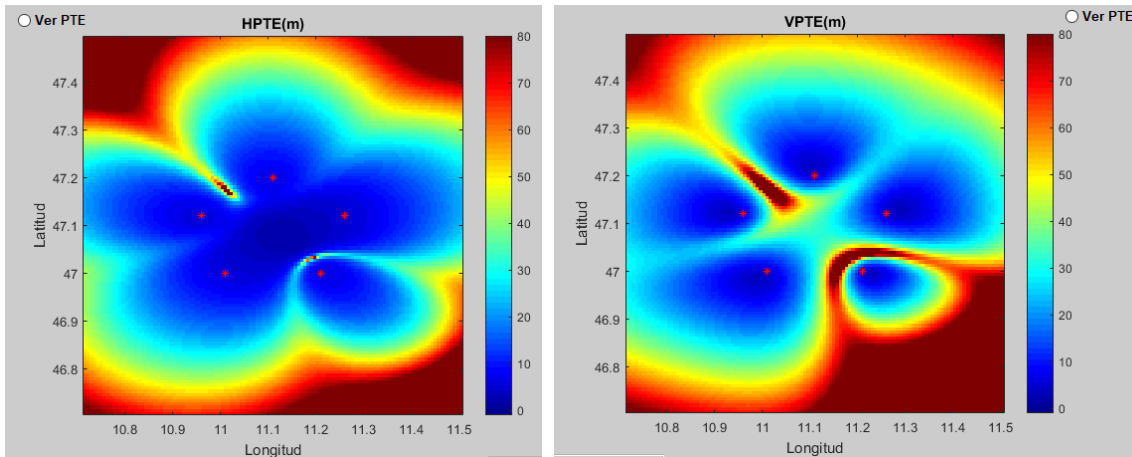


Figura 46. CRLB en zona montañosa, geometría pentagonal, 5 estaciones, 4000 m altitud barométrica.

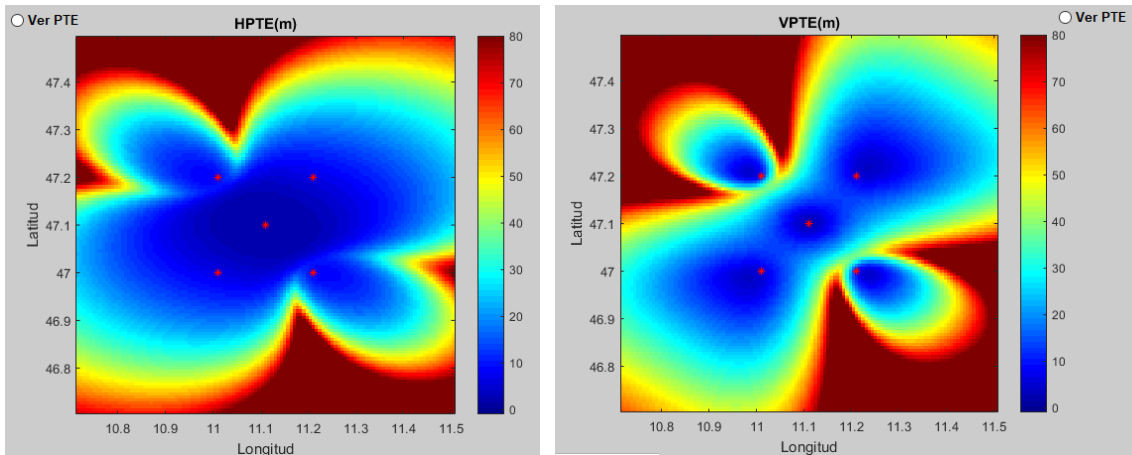


Figura 47. CRLB en zona montañosa, geometría cuadrada, 5 estaciones, 4000 m altitud barométrica.

Como podemos observar los resultados no son del todo los esperados, en las configuraciones de las figuras 45 y 46, no podemos decir con absoluta certeza que la distribución triangular es mejor que la cuadrada, ya que aunque tiene visión radioeléctrica en todos los puntos, no presenta una mayor cobertura y mejora del CRLB en el entorno.

Para las geometrías de las figuras 47 y 48 sucede lo mismo, la configuración cuadrada con cinco estaciones no supone una mejora del nivel de CRLB respecto a la pentagonal, podríamos decir incluso que la configuración pentagonal presenta mejores niveles de CRLB.

Como resultado en este punto podemos decir que la geometría de las estaciones es muy importante, al igual que la ubicación de estas, ya que lo ideal es que estén posicionadas de manera que tengan visión radioeléctrica en todos los puntos y que los obstáculos que pueden estar presentes en la zona de cobertura no afecten al rendimiento de estas. También a tener en cuenta que la separación entre estaciones determina la distancia del área de cobertura que pueda cubrir el sistema, que para los sistemas destinados a un área de terminal de maniobras esta separación suele ser de 10-20 NM. Muy importante también sobre todo en este tipo de zonas, que el número de estaciones sea el adecuado para que el sistema presente una cierta redundancia, puesto que se puede dar el caso que una o varias estaciones no proporcionen cobertura en ciertas zonas debido al terreno y no aporten información para calcular la posición de la aeronave en esa zona reduciendo el nivel de precisión.

6.3 Estudio de los algoritmos utilizados.

Los algoritmos utilizados en el sistema como ya se ha comentado en secciones anterior son los algoritmos de Schau-Robinson y Schmidt. En esta parte trataremos de buscar un criterio para ver cuál es más eficiente, a partir de las gráficas obtenidas en el estudio por trayecto.

Utilizaremos esta tabla de propiedades para todo el estudio:

Propiedades estaciones:

Altura mástil de la antena. h= 10 m	Ganancia de recepción. GR= 3 dB	Pérdidas en recepción. LR= 3 dB	Ganancia de amplificación. GA= 10 dB	Factor de Ruido. FR= 1 dB
Sensibilidad en el receptor. Sens= -95dBm	Margen sobre la sensibilidad. M= 0dB	Error instrumental en el receptor. sigma_inst= 6.00e-09 s	Temperatura de trabajo. T0= 290K	Ancho de banda en el receptor. B=20MHz.

Propiedades en la transmisión:

Potencia en la transmisión: PT= 57 dBm	Ganancia en la transmisión. GTRX=0 dB	Pérdidas en el transmisor. LTRX= 2 dB	Pérdidas por absorción atmosférica. Alpha= 0 dB/km
--	---	---	--

Tabla 3. Datos de referencia, tercer modelo.

Utilizaremos una configuración romboidal para la geometría de las estaciones y su lugar de ubicación será Albacete.

Estudiaremos los dos trayectos trazados en el mapa de la siguiente figura:

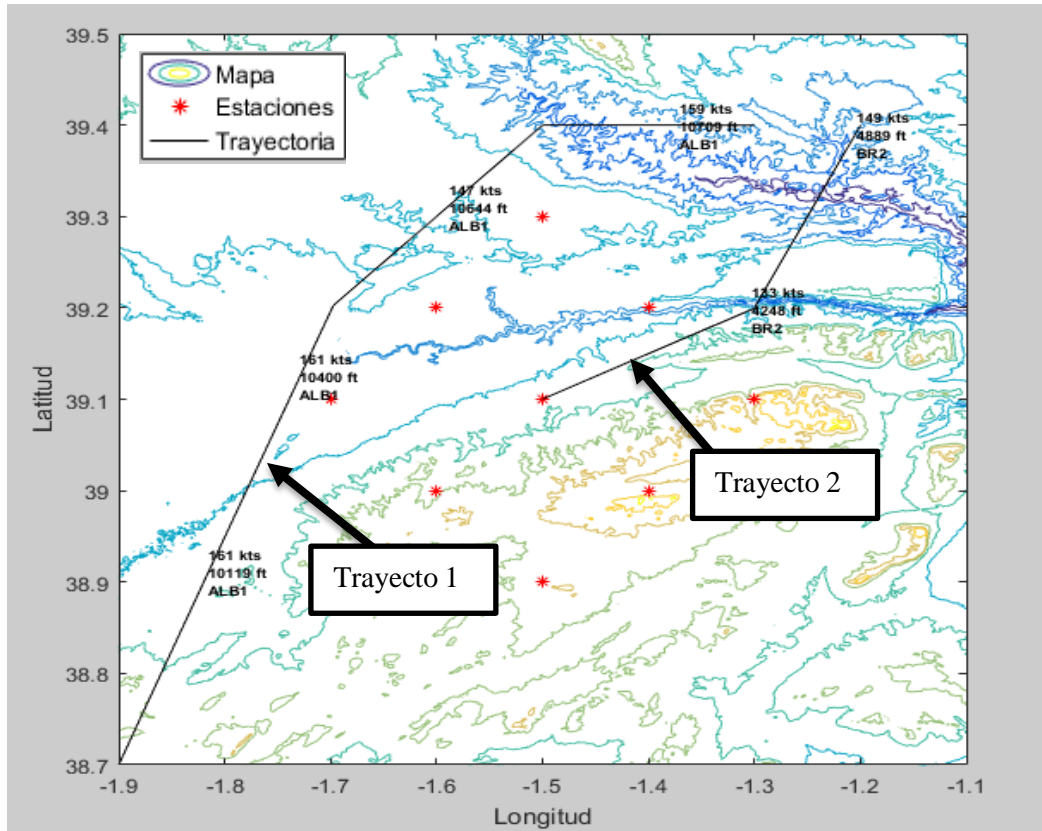


Figura 48. Terreno Albacete, dos trayectorias, geometría de estaciones romboidal.

6.3.1 Análisis del primer trayecto.

Para que tengamos una idea de la cobertura que proporciona el sistema a la aeronave del trayecto uno, el avión se desplaza en torno a una altitud barométrica de 3000 metros y la siguiente figura sería el CRLB obtenido en esa área a 3000 metros de altura sobre el mar.

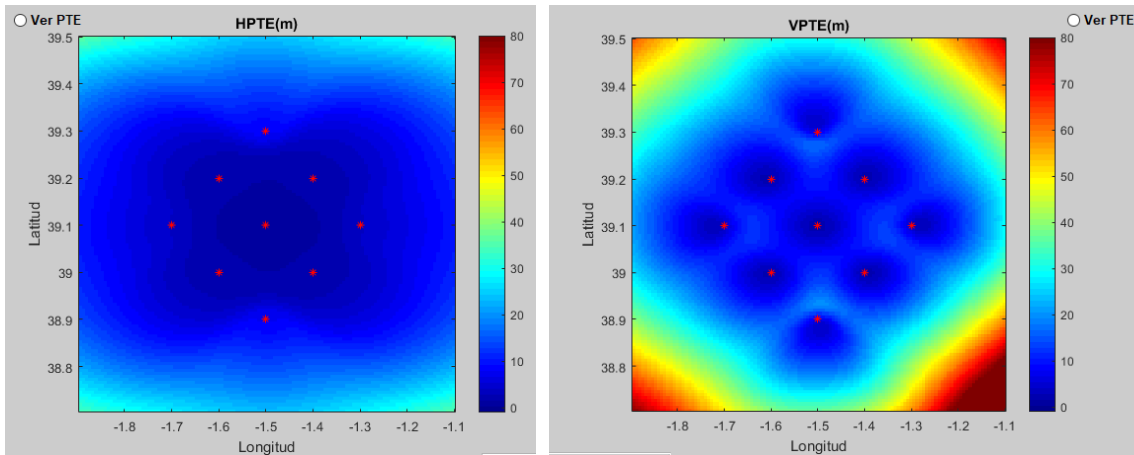


Figura 49. CRLB en Albacete, geometría romboidal a 3000 metros de altitud barométrica.

Y en la siguiente figura el CRLB de la trayectoria con el valor del RMSE en cada uno de los algoritmos.

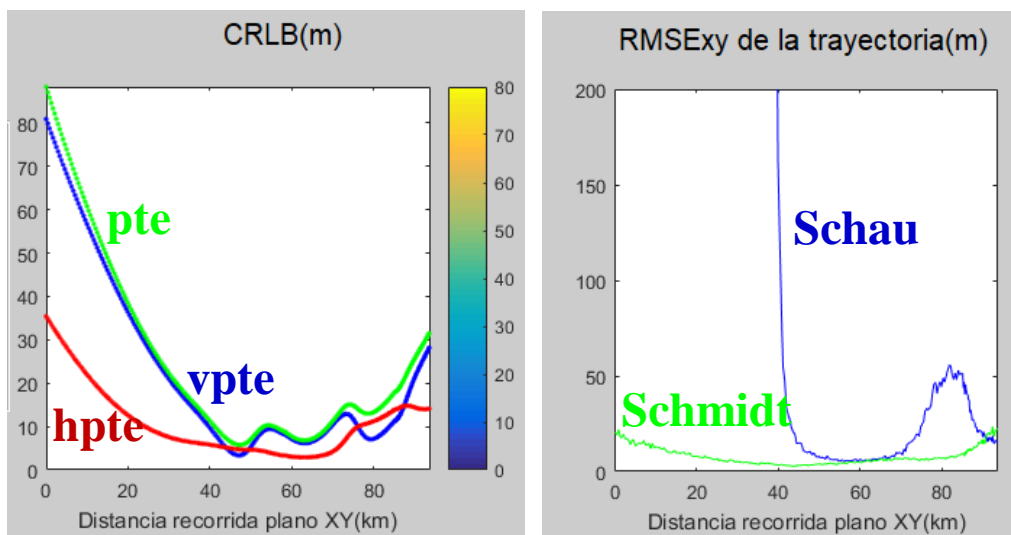


Figura 50. CRLB y RMSE de la trayectoria 1.

Como se aprecia los niveles de CRLB son elevados al principio del trayecto, sobre tener una buena cobertura de precisión en la zona como se ve en la figura 50, esto se debe a que la aeronave empieza su trayecto en la esquina inferior izquierda donde no hay buena cobertura vertical.

Como se puede ver el algoritmo de Schmidt es más eficiente en este caso, ya que a pesar de los altos niveles de CRLB al principio sus valores del error medio cuadrático en el trayecto son

bastante moderados. En cambio parece que el algoritmo de Schau-Robinson se vea afectado por los niveles precisión, visto que su valor de RMSE no baja hasta que los valores del CRLB no descienden también.

El efecto que tiene el CRLB y RMSE se puede apreciar en las trayectorias calculadas por los algoritmos, como se ve en la siguiente figura.

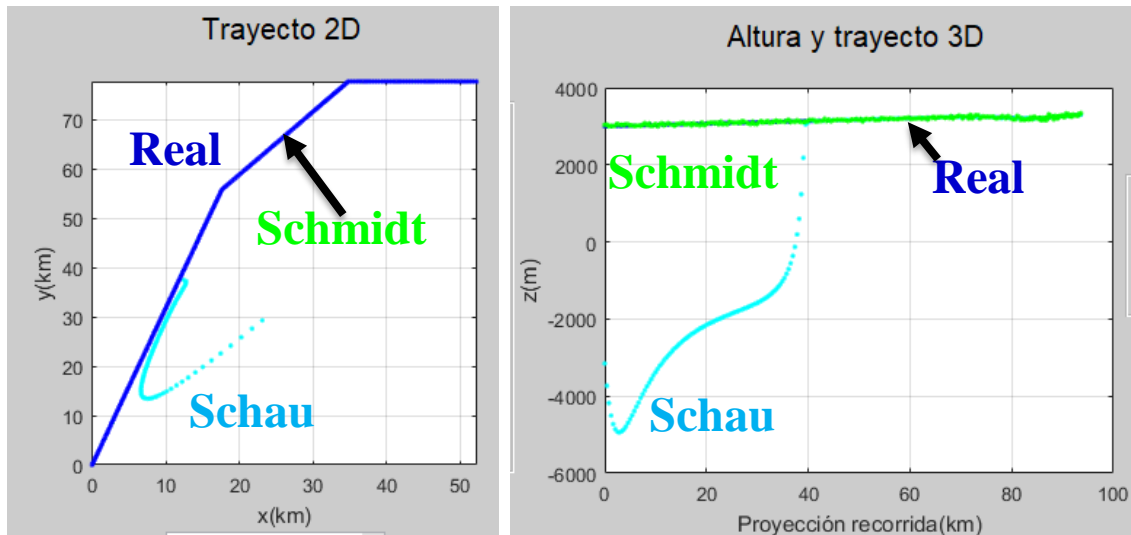


Figura 51. Trayectorias de los algoritmos en 2D y sus alturas.

La figura anterior muestra las proyecciones en 2D y las alturas de los trayectos calculados por los algoritmos. En la imagen se puede apreciar como el trayecto calculado por Schmidt es prácticamente el real ya que en ambas gráficas están solapados. Por otra parte, el de Schau se ve claramente que al principio de su recorrido contiene desviaciones y más aún en la altura. Esto último se puede explicar mediante la figura 51, donde se ve que la desviación en la precisión vertical es más elevada.

Antes de realizar conclusiones analicemos el segundo trayecto y sus resultados en el siguiente punto.

6.3.2 Análisis del segundo trayecto.

Como en el anterior punto mostramos la cobertura que ofrece el sistema, para las alturas que recorrerá la aeronave, que serán alrededor de una altura barométrica de 1300 metros.

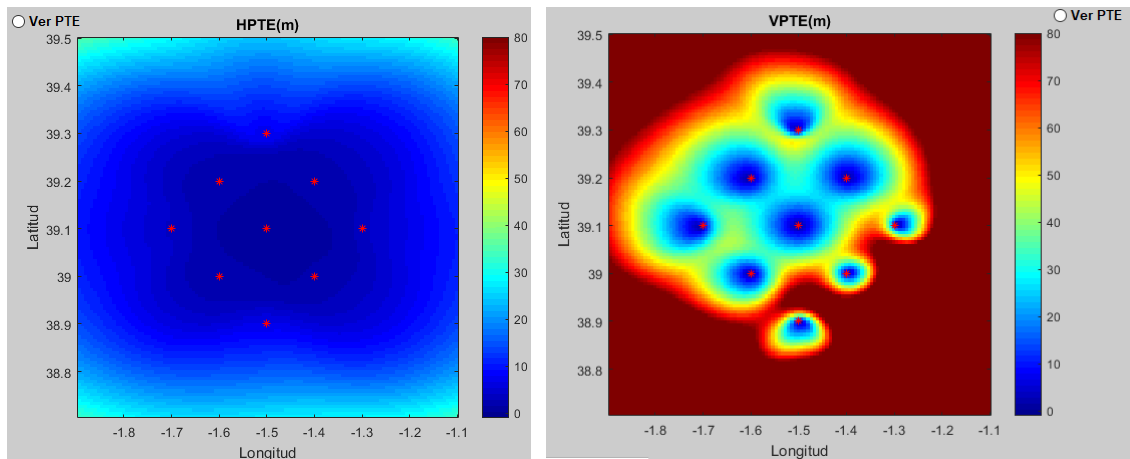


Figura 52. CRLB en Albacete, geometría romboidal a 1300 metros de altitud barométrica.

Y en la siguiente figura el CRLB de la trayectoria con el valor del RMSE en cada uno de los algoritmos.

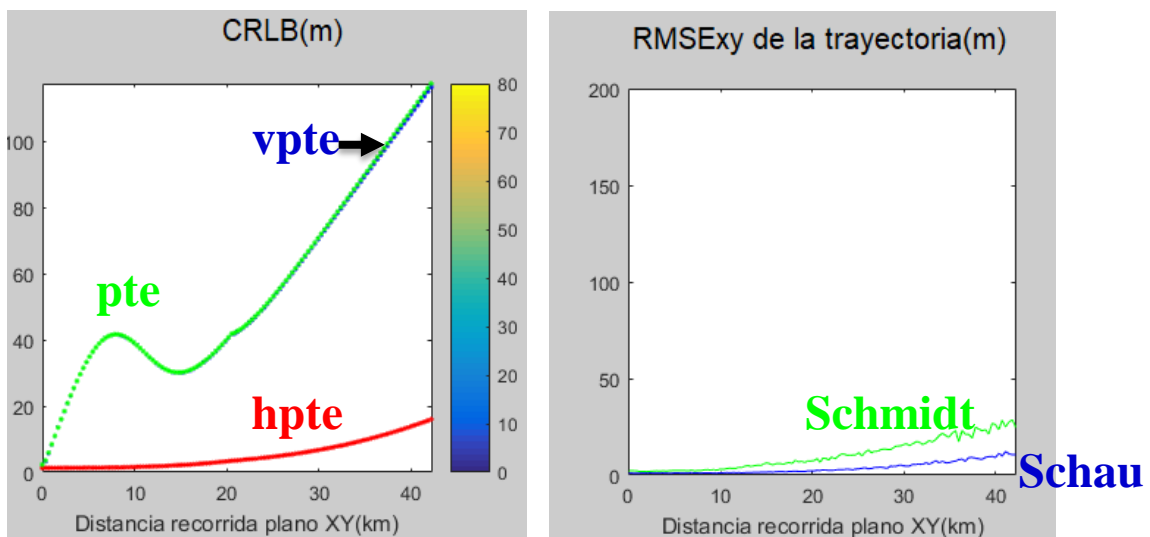


Figura 53. CRLB y RMSE de la trayectoria 2.

En este caso nos encontramos que el algoritmo de Schau-Robinson es más eficiente que el de Schmidt, ya que introduce menos error. Esto se ve mejor reflejado en la siguiente figura donde se muestran los trayectos en 2D y sus alturas.

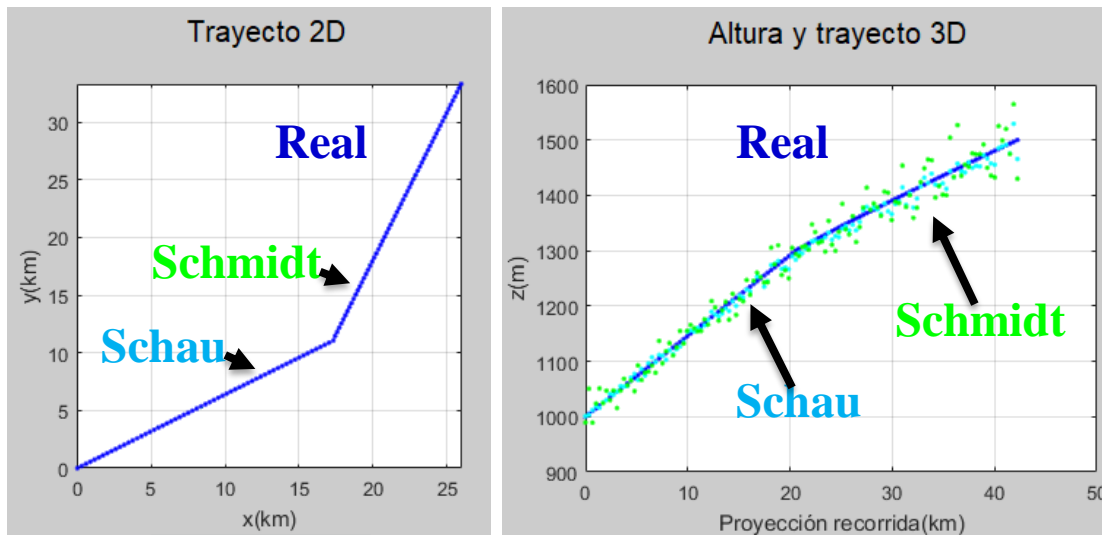


Figura 54. Trayectorias de los algoritmos en 2D y sus alturas.

Como se observa las proyecciones en 2D de las trayectorias son idénticas y en cuanto a la altura que toman estas trayectorias se puede decir que la de Schau se aproxima un poco más que la de Schmidt a la real. En este caso la precisión del algoritmo de Schau-Robinson es mejor que la de Schmidt, aunque esta última también sea bastante precisa.

La explicación de que antes no obtuviéramos buena precisión con Schau-Robinson y ahora sí, se debe a que en este caso la aeronave, en el principio de su trayecto, se encontraba en una zona donde había buena cobertura de precisión y el algoritmo ha podido realizar un adecuado posicionamiento del aeronave y a partir de ahí poder seguir su rumbo, incluso en zonas donde los niveles de cobertura no aportaban tan buena precisión vertical, ya que como se puede ver en la figura 54, los valores de las desviaciones de la precisión vertical han ido aumentando.

Aunque en este caso el algoritmo de Schau-Robinson sea más eficiente no quiere decir que lo sea en general cuando suceden las mismas circunstancias, como en la siguiente imagen.

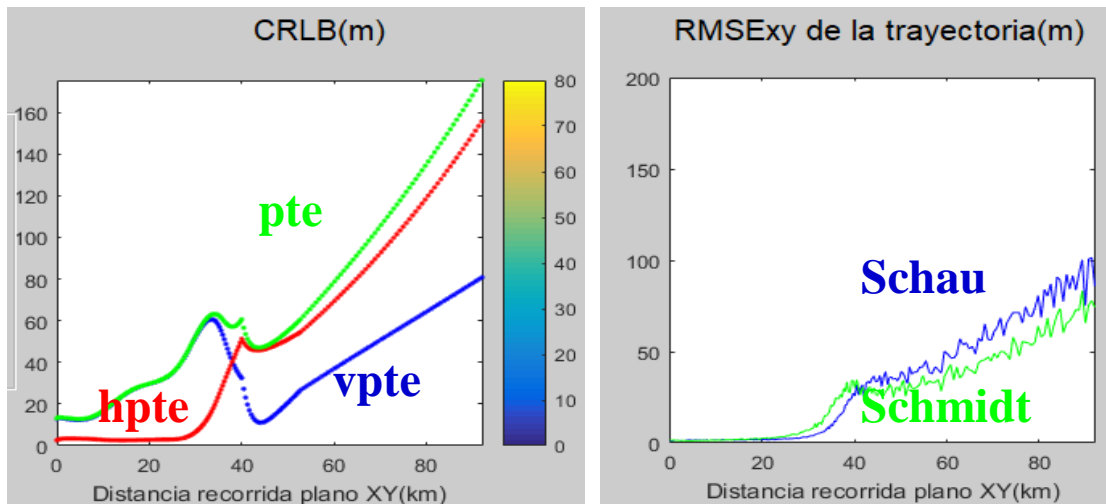


Figura 55. CRLB y RMSE de una trayectoria en Innsbruck.

En este caso sobre tener una buena cobertura al principio de la trayectoria, el algoritmo de Schmidt es más eficiente, por lo tanto, no podemos afirmar que al algoritmo de Schau-Robinson funcione mejor bajo esas condiciones. Lo que si que podemos afirmar teniendo en cuenta las pruebas realizadas, es que el algoritmo de Schmidt puede funcionar sin requerir buenos niveles de cobertura, por lo tanto desde mi punto de vista es más eficiente que el de Schau-Robinson.

6.4 Reducción de errores con filtro de Kalman.

A continuación un ejemplo para verificar el funcionamiento y utilidad de este filtro en la vigilancia aérea, porque como hemos explicado en el punto 4.2.2, este filtro utilizando información de interés que afecta al sistema permite reducir sus errores en el posicionamiento de la aeronave.

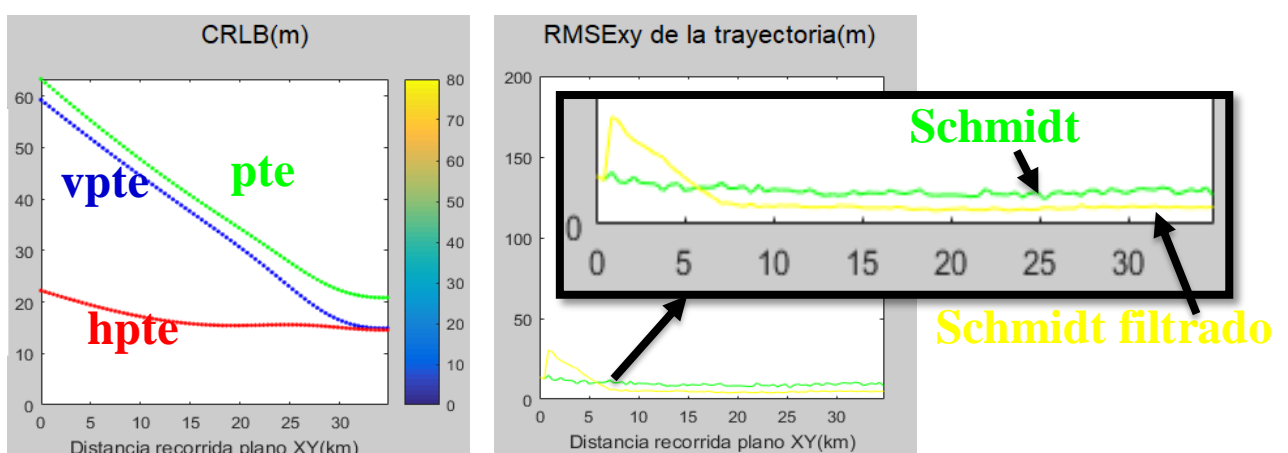


Figura 56. RMSE con Schmidt y con Schmidt filtrado con Kalman.

Como se ve en el ejemplo se verifica el funcionamiento del filtro ya que reduce su RMSE. En la siguiente figura observemos su efecto en el trayecto calculado.

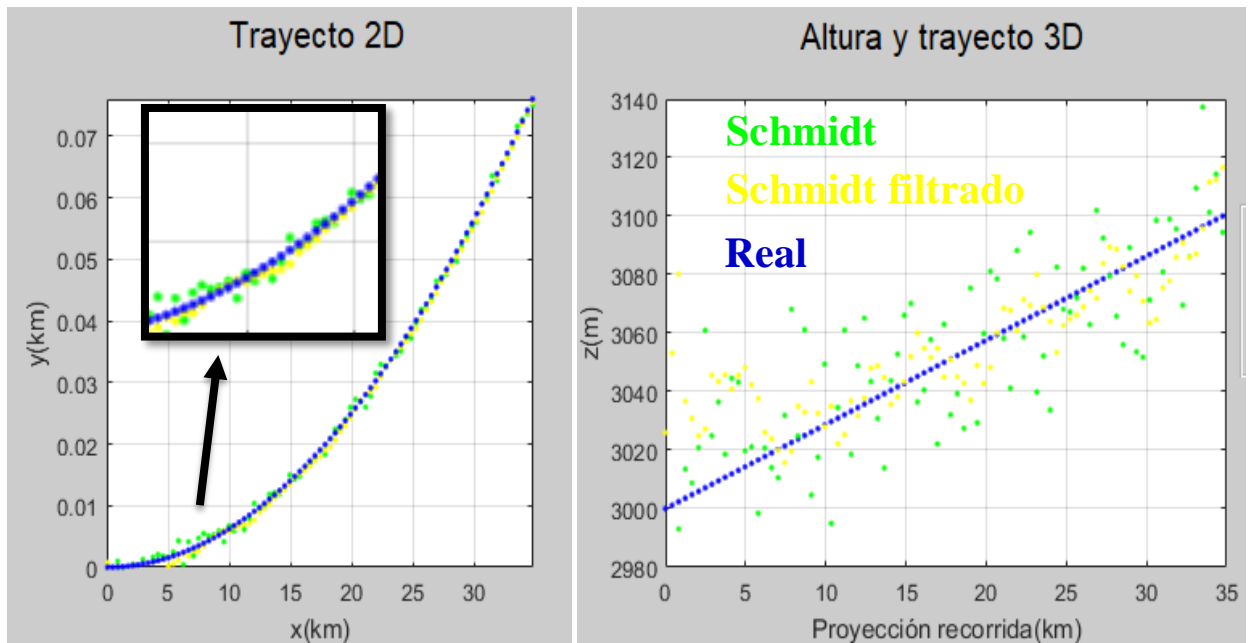


Figura 57. Trayectoria 2D y alturas, Schmidt y Schmidt filtrado.

Tal y como se ve el patrón de puntos de Schmidt con filtrado mediante Kalman es más próximo a los valores reales de la trayectoria, de esta forma podemos verificar el funcionamiento del filtro de Kalman.

7. CONCLUSIONES.

En este proyecto se han estudiado los sistemas de multilateración, una tecnología para el posicionamiento de las aeronaves, que es adecuada para trabajar en entornos colindantes a los aeropuertos donde se implantan estos sistemas, debido a que ofrece mejores prestaciones que otras tecnologías actuales, entre ellas reducción del tráfico de mensajes, mayores tasas de actualización, tolerancia ante fallos en las estaciones, mayor visibilidad radioeléctrica, mayor precisión y niveles de cobertura y menores costos de implantación y mantenimiento.

Para este trabajo se ha desarrollado un simulador de sistemas de multilateración para vigilancia aérea enfocado para trabajar en entornos aeroportuarios, el cuál mediante el estudio de los parámetros introducidos por el usuario, permite simular esta tecnología para analizar la capacidad de los sistemas ya implantados en los aeropuertos o futuras instalaciones, mediante gráficas de resultados obtenidas.

A partir de esta herramienta hemos podido estudiar las propiedades que afectan a estos sistemas para concluir cuáles serán las más determinantes en su rendimiento. Entre ellas la geometría de las estaciones y su ubicación, debido a que afectan directamente a la precisión en toda su área de aplicación al igual que al alcance de la cobertura y visibilidad radioeléctrica. El número de estaciones para aumentar la precisión en el posicionamiento y tener una mayor tolerancia ante fallos en las estaciones. Y finalmente el error instrumental que perjudica directamente la calidad en las mediciones de los TOA's en las estaciones. Los otros factores no determinantes que han sido estudiados son la altura del mástil de las antenas y los parámetros que afectan al nivel de señal recibida, los cuales hemos definido que no son los más importantes en este estudio, pero si que hay que tenerlos en consideración ya que pueden interferir en el rendimiento del sistema. Con el manejo de la altura del mástil se puede mejorar la visión radioeléctrica de las estaciones y con un buen ajuste de los parámetros que afectan al nivel de señal recibida, se puede proveer de la intensidad de señal suficiente a las estaciones para realizar los cálculos de posicionamiento y mantener un SNR bajo.

También con la ayuda de la herramienta hemos estudiado los algoritmos de posicionamiento que hemos incluido en el simulador, debido a que estos también influyen en el rendimiento del sistema. Y con ayuda del estudio realizado hemos concluido que el algoritmo de Schmidt proporciona en general un mayor rendimiento que el de Schau-Robinson, puesto que puede funcionar eficientemente incluso en condiciones con mala cobertura de precisión.

Finalmente, para optimizar las trayectorias calculadas por los algoritmos en los sistemas de multilateración se utiliza un filtro de Kalman, el cual se ha programado en el simulador y como

se ha comprobado elimina ciertos errores producidos en el sistema, realizando trayectorias más precisas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abbud Momma, J. (2015). *Localización y seguimiento de aeronaves mediante sistemas de multilateración de área extensa*. Ingeniero de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [2] Brookner, E. (2005). *Tracking and kalman filtering made easy*. New York.
- [3] Camarena Ibarrola, J. (2017). *El filtro de Kalman*.
- [4] ICAO. *Aeronautical Surveillance Manual, Doc 9924, First Edition, 2011*.
- [5] Jiménez, F.J. (2015). *Estudio sobre los sistemas de comunicaciones, navegación, vigilancia y gestión del tráfico aéreo (CNS/ATM): Situación actual y evolución futura*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [6] Mantilla Gaviria, I. (2013). *New Strategies to Improve Multilateration Systems in the Air Traffic Control*. Universitat Politècnica de Valencia, Valencia.
- [7] Mantilla, I,A y Balbastre, J.V. *Sistemas de Multilateración para el control de tráfico aéreo*.
- [8] Rodríguez-Aragón, L. (2011). *Simulación, Método de Montecarlo*. Universidad de Castilla-La Mancha, Castilla- La Mancha.
- [9] Tusell, F. (2007) *Estadística matemática*. Universidad del País Vasco, País Vasco.
Available at: <http://www.et.bs.ehu.es/~etptupaf/nuevo/ficheros/estad5/deci.pdf>

9. ANEXOS

9.1 Manual del Simulador.

En esta sección vamos a explicar cómo utilizar el simulador, detallaremos entre otras cosas cómo se introducen los datos, el tipo de datos que se permiten cargar, la función de cada una de las interfaces y los resultados que se pueden obtener.

9.1.1 Menú de Inicio.

Este sería el menú de comienzo del programa, donde en cada uno de los bloques de la izquierda se puede pulsar para obtener información de las diferentes interfaces principales por las que está compuesto el simulador.



Figura Simulador 1. Menú principal.

Como se puede apreciar en la Figura Simulador 1 estos bloques en orden son los siguientes: Introducir Área, Propiedades/Coordenadas estaciones, Introducir Trayectorias, Propiedades de transmisión y Resultados. Cada bloque será explicado en su interfaz correspondiente, para empezar a introducir los datos el usuario deberá seleccionar el botón “Empezar” e inmediatamente se abrirá la interfaz de Introducir Área. Si por el contrario el usuario ya ha realizado un estudio previamente, no es necesario volver a introducir los datos de nuevo, basta con seleccionar el botón “Ir a Resultados” y directamente se abrirá la interfaz de resultados, en la que el usuario tiene que cargar el estudio.

9.1.2 Introducir Área.

En esta interfaz se deberán introducir las coordenadas del área del mapa donde se va a trabajar, en concreto se introducirán la latitud mínima y máxima y la longitud mínima y máxima del mapa. Esta zona contendrá las estaciones receptoras y las trayectorias de las aeronaves.

The screenshot shows a software interface titled "Área del mapa". At the top right, there is a button labeled "Cargar coordenadas". Below this, the text "Latitud mínima" is displayed. On the left, there is a dropdown menu with "Latitud mínima" selected. In the center, there are two main input sections: "Coordenadas centesimales" with a text box containing "38.7", and "Coordenadas sexagesimales" which is further divided into three columns: "Grados" with "38", "Minutos" with "42", and "Segundos" with "1.03917e-1". To the left of these inputs is a "Reset" button. At the bottom, there are three buttons: "Atrás" on the left, "Visualizar mapa" in the center, and "Siguiete" on the right.

Figura Simulador 2. Introducir área.

En esta interfaz podemos teclear las coordenadas en formato centesimal o sexagesimal, también permite cargar las coordenadas almacenadas en un fichero pulsando el botón "Cargar coordenadas". En varias interfaces estará la opción de cargar datos numéricos almacenados en carpetas y los formatos de datos que puede abrir el programa son .mat y .xlsx. Si el usuario introduce un archivo incorrecto saltará el siguiente mensaje de error:

Error.

Alguno de los archivos cargados no es correcto.

Figura Simulador 3. Mensaje de error, archivo incorrecto.

En esta interfaz el archivo correcto para poder cargarse deberá tener uno de los formatos anteriores comentados y será un vector de tamaño “ $1x4$ ” o “ $4x1$ ”, correspondiente a las coordenadas a introducir en este orden: latitud mínima, latitud máxima, longitud mínima, longitud máxima.

Esta interfaz cuenta con un “*Reset*”, cuya función es volver a cero los valores de las coordenadas, también está la opción de visualizar el mapa una vez introducidas las coordenadas, además de los botones “Atrás” y “Siguiente” para volver al menú de Inicio y avanzar a la siguiente interfaz respectivamente.

Si no se introduce ningún dato y el usuario pulsa “*Siguiente*” aparecerá el siguiente mensaje:

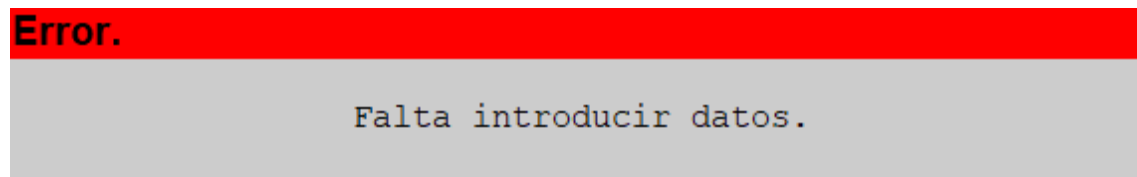


Figura Simulador 4. Mensaje Error, faltan datos.

9.1.3 Propiedades/Coordenadas estaciones.

Para la siguiente parte del simulador se debe introducir el número de estaciones, las coordenadas de las estaciones (formato centesimal o sexagesimal) dentro del área de trabajo y las propiedades de cada estación.

Parámetros de las estaciones

Número de estaciones ← En caso manual introducir primero

Coordenadas de las estaciones

Introducción Manual

Número de estación Coordenadas Geográficas

Altura barométrica(m)

Coordenadas centesimales

Coordenadas sexagesimales

Grados	Minutos	Segundos
<input style="width: 30px;" type="text" value="39"/>	<input style="width: 30px;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 30px;" type="text" value="0"/>

Propiedades de las estaciones

Introducción Manual

Número de estación Propiedad

h: Altura de los mástiles de las antenas en metros.

Figura Simulador 5. Parámetros de las estaciones.

La información se puede suministrar manualmente o cargándola, en el caso manual el usuario primero debe introducir el número de las estaciones y luego ya podrá rellenar los datos de las coordenadas y propiedades.

Las coordenadas de las estaciones serán latitud, longitud en coordenadas centesimales o sexagesimales y altura barométrica en metros de cada estación.

Las propiedades de las estaciones a introducir serán las siguientes en orden: Altura de los mástiles de las antenas(m), ganancia de recepción(dB), pérdidas en el receptor(dB), ganancia de amplificación de la antena de recepción(dB), factor de ruido en el receptor(dB), sensibilidad del receptor(dB), margen sobre la sensibilidad(dB), error instrumental del receptor(s), temperatura de trabajo(K) y ancho de banda del receptor(Hz).

Como en cada interfaz tenemos los pulsadores de “Reset” para resetear las coordenadas y las propiedades de las estaciones, al igual que también podemos retroceder o avanzar a la siguiente interfaz con “Atrás” y “Siguiete”. También está la opción de visualizar el mapa para ver las estaciones posicionadas sobre él.

Como en todas las interfaces existe la posibilidad de cargar los datos (formatos .mat o .xlsx) y tienen que tener un tamaño especial:

-“*Cargar Coordenadas*”: Las coordenadas de las estaciones debe de ser un vector de tamaño “*Número_estaciones x 3*” o “*3 x Número_estaciones*”, que corresponde a la latitud, longitud y altura barométrica en cada una de las estaciones.

-“*Cargar Propiedades*”: Las propiedades de las estaciones debe de ser un vector de dimensiones “*Número_estaciones x 10*” o “*10 x Número_estaciones*”, que corresponden a las propiedades en orden de cada estación comentadas anteriormente.

9.1.4 Introducir Trayectorias.

Esta interfaz gráfica calcula las trayectorias de las aeronaves en el área del mapa, estas se pueden calcular de diferentes maneras a gusto del usuario y se explicarán a continuación. Antes que nada hay que introducir el tiempo de actualización de las posiciones y el identificador del avión, luego seleccionar el método por el que queremos calcular las trayectorias y finalmente introducir los datos y pulsar calcular. Los tres métodos de cálculo de las trayectorias son los siguientes:

- **Método 1:** Este método consiste en cargar la trayectoria directamente de un archivo, el dato que se debe cargar es un vector de dimensiones “*Número_puntos_trayecto x 3*” o “*3 x Número_puntos_trayecto*”. Este vector almacenará las coordenadas latitud, longitud y altura barométrica en cada punto del trayecto.
- **Método 2:** Se basa en la introducción del waypoint inicial(latitud0(grados),longitud0(grados),altura0(m)) de la trayectoria y una serie de parámetros: Número de tramos, longitud de cada tramo(m), velocidad media del tramo(km/h), alpha(grados), theta(grados). Siendo alpha el ángulo de giro del avión, que forma la proyección de la trayectoria en el plano horizontal con el eje X , theta el ángulo de elevación de la aeronave y la altura0 es la altitud barométrica en metros.

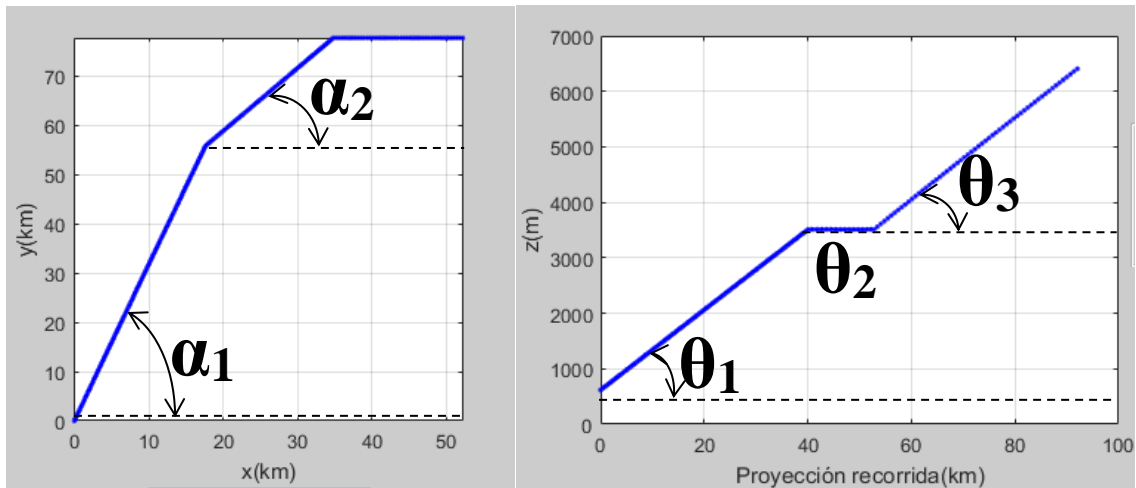


Figura Simulador 6. Ejemplo ángulos alpha y theta

- **Método 3:** Consiste en introducir el número de waypoints totales y sus coordenadas (latitud (grados), longitud (grados), altura (m)) y para cada tramo del trayecto su velocidad media (km/h). La altura como en el método dos será la altitud barométrica de la aeronave.

La siguiente figura muestra la interfaz gráfica que estamos detallando:

The screenshot shows the 'Trayectoria del avión' software interface. At the top, it says 'Método 1' is selected, but 'Método 3' is selected in the main configuration area. The interface includes several input fields and buttons:

- Información:** A button to get help.
- Time actualización(s):** Set to 5.
- Identificador avión:** Set to AV6.
- Método 2:** Includes fields for 'Waypoint inicial' (Lat0, Lon0, Z0) and a 'Cargar WP0' button.
- Método 3 (Selected):** Includes a 'Waypoint' dropdown (set to Waypoint 1), 'Cargar WP' button, and fields for 'Latitud' (39.8), 'Longitud' (-1.8), and 'Altura' (2000). A 'Reset WP' button is also present.
- Parameters:** Includes 'Número de tramos' (set to 6), 'Tramo' dropdown (set to Tramo 1), 'Velocidad media (km/h)' (set to 300), 'alpha (°)', and 'theta (°)' fields, each with a 'Cargar' button. A 'Reset Parámetros' button is also present.
- Listado de aviones:** A list on the right showing AV1 through AV6, with AV6 selected.
- Buttons:** 'Atras', 'Ver trayecto', 'Calcular', and 'Siguiente' are located at the bottom.

Figura Simulador 7. Introducir Trayectorias.

La interfaz cuenta con un pulsador “*Información*” que explica todo lo necesario a saber en esta parte, un interruptor “*Ver trayecto*” para visualizar el trayecto dentro del mapa con las estaciones,

otros dos botones “Atrás” y “Siguiente” para proseguir con la posterior o anterior interfaz, también cuenta con interruptores “Reset” y “Cargar” para resetear los parámetros o waypoints introducidos y para cargar los valores o vectores de los datos correspondientes como se explica a continuación.

Método 1:

- “Cargar Trayectoria Completa”: Toma un vector de dimensiones “Número_puntos_trayecto \times 3” o “3 \times Número_puntos_trayecto”, que almacena las coordenadas latitud, longitud y altura barométrica en cada punto del trayecto

Método 2:

- “Cargar WPO”: Toma un vector de dimensiones “1 \times 3” o “3 \times 1”, que almacena la latitud, longitud y altura barométrica inicial.
- “Cargar”: Toma un vector de dimensiones “1 \times Número_tramos ” o “ Número_tramos \times 1”. Este vector corresponde en cada caso a la longitud, velocidad media, alpha o theta en cada tramo.

Método 3:

- “Cargar WP”: Toma un vector de dimensiones “Número_Waypoints \times 3” o “3 \times Número_Waypoints”, que posee la latitud, longitud y altura barométrica en cada waypoint de la trayectoria.
- “Cargar”: Toma un vector de dimensiones “Número_Waypoints -1 \times 1” o “1 \times Número_Waypoints -1”, el cual contiene la velocidad media en cada tramo del trayecto.

El usuario no debe preocuparse por introducir un dato incorrecto o por cometer cualquier error que afecte a los cálculos, el programa detecta estos fallos y ejecuta una ventana de mensaje de errores como los siguientes:

- Alguno de los archivos cargados no es correcto.
- Falta introducir datos.
- No se ha calculado el trayecto del avión.
- No ha seleccionado ningún método.
- No se han calculado los datos.

Por último esta interfaz, como se puede ver a la derecha de la Figura Simulador 7, posee un recuadro con el listado de las trayectorias introducidas con el identificador de cada aeronave. Si queremos borrar alguna de las trayectorias introducidas, debemos seleccionar en el listado de aviones el identificador de la aeronave correspondiente y pulsar “*Eliminar seleccionado*”.

9.1.5 Propiedades en la transmisión.

Para esta sencilla interfaz de usuario debemos seleccionar el identificador del avión correspondiente e introducir los datos: Potencia en la transmisión(dBm), ganancia de transmisión(dB), pérdidas en el transmisor(dB), pérdidas por absorción atmosférica(dB/km).

The image shows a software interface titled "Propiedades en la Transmisión". It has a light gray background. At the top left, there is a label "Identificador de avión" above a dropdown menu showing "AS1". To the right of this is a button labeled "Cargar Propiedades". In the center, the text "Introducir las propiedades" is displayed. Below this, there is a sub-section containing a dropdown menu labeled "PT" with "PT" selected, a text input field containing the number "57", and a "Reset" button. Underneath the input field is the text "PT: Potencia de transmisión en dBm.". At the bottom of the interface, there are two buttons: "Atrás" on the left and "Siguiete" on the right.

Figura Simulador 8. Propiedades en la Transmisión.

Tenemos como siempre interruptores de “Reset”, “Atrás” y “Siguiete” y “Cargar Propiedades”, en este último, en caso de no introducir los datos manualmente y cargarlos mediante un fichero, debemos seleccionar un archivo que contenga un vector de tamaño “1 x 4” o “4 x 1”, correspondiente a las propiedades a introducir en orden.

9.1.6 Resultados.

Esta interfaz nos permite visualizar los resultados obtenidos, podemos ver los resultados del estudio por área pulsando “*Visualizar cobertura en el Área*” y para ver los resultados del estudio por trayecto debemos introducir o cargar el valor de la constante de MonteCarlo(K) y pulsar “Calcular”.

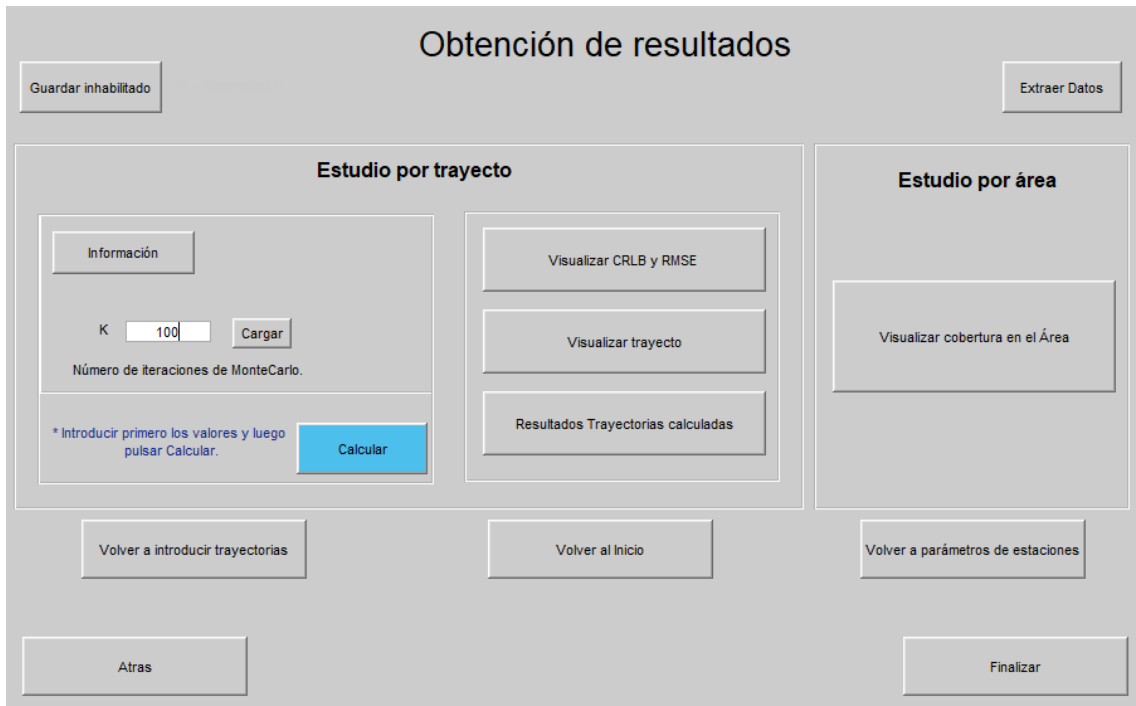


Figura Simulador 9. Resultados.

Antes de explicar los resultados que podemos obtener, informamos de las diferentes opciones que tiene esta interfaz:

- “*Atrás*”: Vuelve a la interfaz anterior.
- “*Volver al Inicio*”: Vuelve al menú de inicio.
- “*Finalizar*”: Cierra el simulador.
- “*Volver a introducir trayectorias*”: Vuelve a la interfaz de introducir trayectorias, por si queremos modificar, eliminar o añadir algún trayecto. Después de modificar las trayectorias se conducirá al usuario a la interfaz de propiedades de la transmisión, para que pueda añadir los nuevos parámetros para cada aeronave introducida. Hay que tener en cuenta que habrá que volver a realizar el cálculo en el estudio por trayecto, para visualizar los resultados de ese estudio.

- “*Volver a parámetros de estaciones*”: Vuelve a la interfaz de parámetros de estaciones, por si queremos modificar alguna característica, luego vuelve a la interfaz de resultados. Hay que tener en cuenta que habrá que volver a realizar el cálculo en el estudio por trayecto, para visualizar los resultados de ese estudio.
- “*Información*”: Describe lo que es la constante de MonteCarlo.
- “*Guardar*”: Una vez realizados los cálculos podemos guardar todos los datos almacenados en una carpeta, que el usuario tiene que nombrar, para luego poder ejecutarlos cómodamente seleccionando la carpeta. Aparecerá “*Guardar inhabilitado*” hasta que no se hayan obtenido todos los datos necesarios para ambos estudios, entonces pasará a “*Guardar habilitado*”.
- “*Extraer Datos*”: Carga todos los datos guardados previamente en una carpeta nombrada por el usuario, seleccionando esta carpeta, para posteriormente visualizar los resultados.

9.1.6.1 Resultados estudio por trayecto.

En la interfaz de resultados pulsando “*Visualizar CRLB y RMSE*” nos llevará a la visualización de los resultados de la Figura Simulador 10.

En la gráfica de CRLB podemos pulsar las opciones “*Vpte*”, “*Hpte*” y “*Pte*”, para visualizar la precisión teórica esperada vertical, horizontal y total respectivamente, para cada trayecto de la aeronave, seleccionando el trayecto con el desplegable del “*Identificador de avión*”.

En la gráfica RMSE podemos ver los resultados de la media cuadrática de los errores de las trayectorias calculadas con los diferentes algoritmos (“*Schau*” y “*Schmidt*”) y los resultados filtrados con Kalman (“*Schau filtrado*” y “*Schmidt filtrado*”), para cada trayecto seleccionado con el desplegable “*Identificador de avión*”.

“*Reset*” limpia las gráficas y deselecciona todas las opciones marcadas anteriormente.

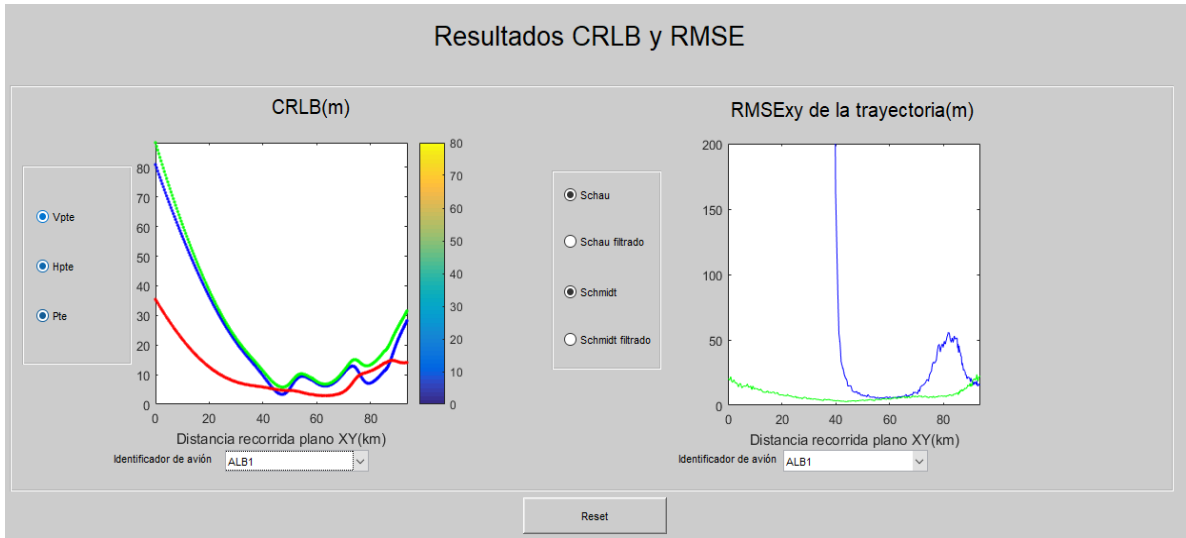


Figura Simulador 10. Resultados CRLB y RMSE.

Seleccionando la opción “Visualizar Trayecto” el simulador nos conduce a la interfaz de la Figura Simulador 11, donde podemos visualizar los trayectos de las aeronaves en el mapa junto con las estaciones.

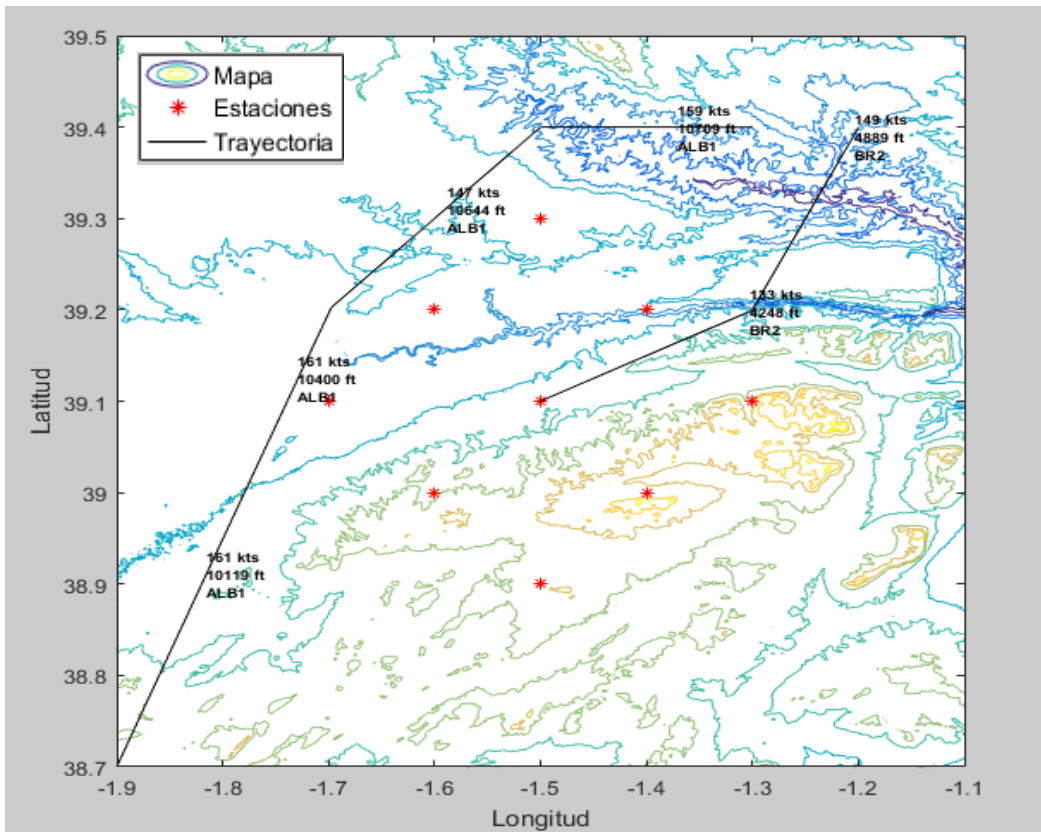


Figura Simulador 11. Resultados Visualizar Trayecto.

Finalmente se puede acceder a los resultados de la interfaz de la Figura Simulador 12 con la opción “Resultados Trayectorias Calculadas”.

En la representación del Trayecto 2D podemos visualizar las trayectorias calculadas en el plano horizontal, con los diferentes algoritmos (“Schau” y “Schmidt”) y los resultados filtrados con Kalman (“Schau filtrado” y “Schmidt filtrado”), para cada trayecto seleccionado con el desplegable “Identificador de avión”.

En la gráfica de Altura y trayecto 3D se representan las trayectorias calculadas en un plano vertical (“Altura del avión”) para ver las alturas de la aeronave y en un plano en tres dimensiones (“Trayectoria en 3D”). Las opciones de los algoritmos son los mismos que los del párrafo anterior.

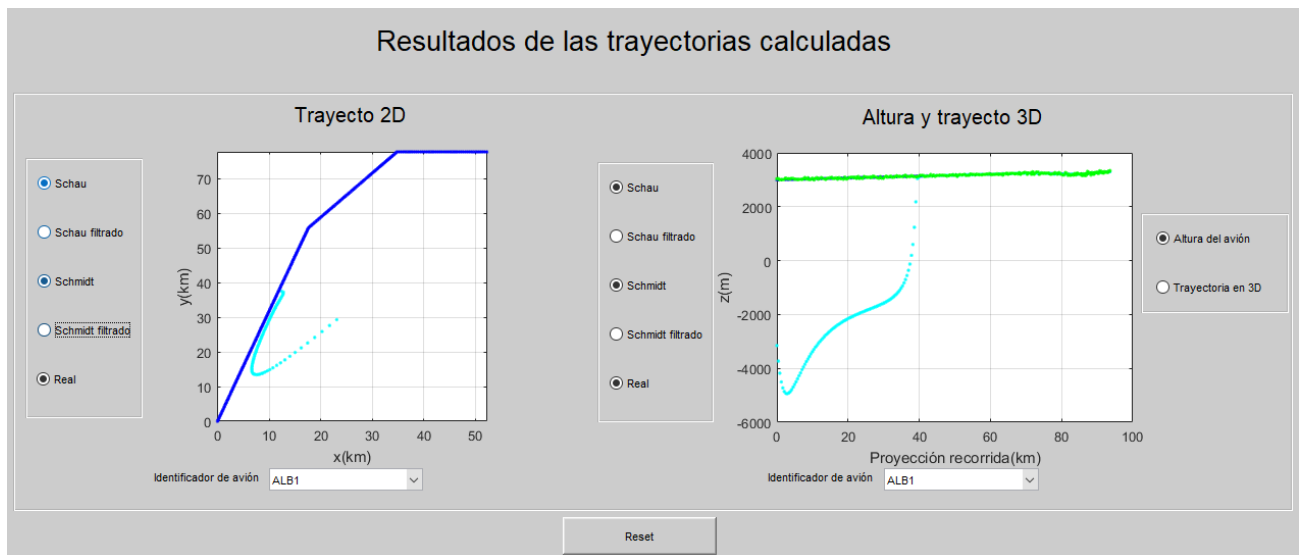


Figura Simulador 12. Resultados de las trayectorias calculadas.

9.1.6.2 Resultados estudio por área.

En la interfaz de resultados seleccionando la opción “Visualizar la cobertura en el Área” accedemos a las gráficas de resultados de la Figura Simulador 13.

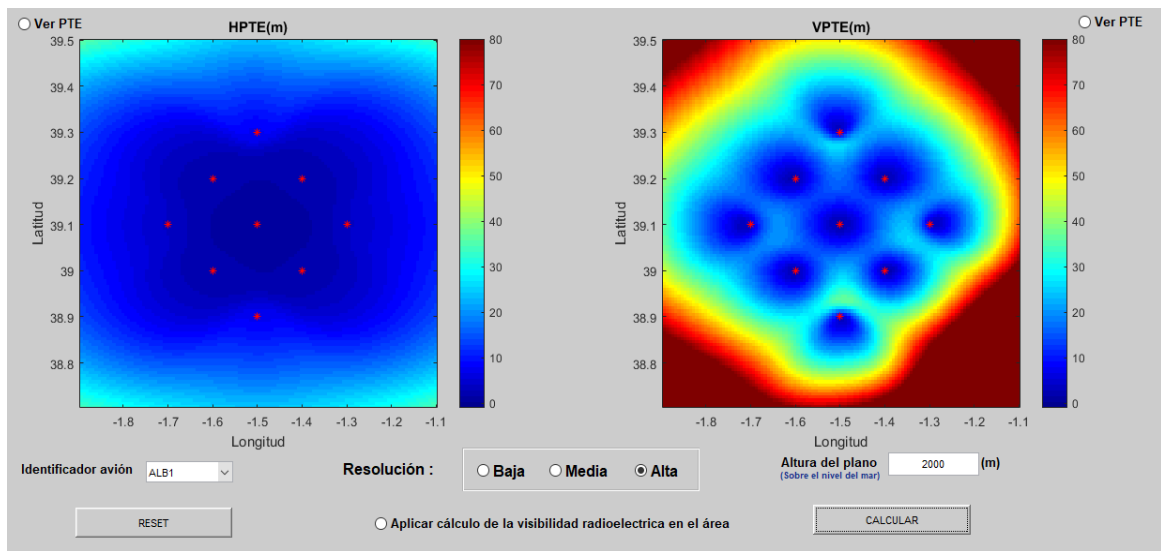


Figura Simulador 13. Cobertura en el área.

Para la representación de los resultados debemos seleccionar una opción con el desplegable “*Identificador avión*”, de esta forma utilizamos las propiedades de transmisión del identificador elegido. Debemos escoger con” *Resolución*” la nitidez con la que queremos observar los resultados, seleccionar la altura del plano a la que vamos a realizar los cálculos y finalmente indicar si queremos aplicar el cálculo de la visión radioeléctrica en el área seleccionada y pulsar “*Calcular*”.

Se ha añadido al simulador la opción “*Aplicar cálculo de la visibilidad radioeléctrica en el área*”, debido a que consume un tiempo de cálculo considerable según la nitidez con la que queremos ver la imagen.

En la gráfica HPTE se representa la precisión teórica esperada horizontal y en la VPTE la precisión teórica esperada vertical y tenemos la opción de visualizar en ambas gráficas la precisión teórica esperada total seleccionando “*Ver PTE*”.

9.2 Listado de funciones utilizadas en el simulador.

Funciones Principales:

- dibujar mapa
- Estvis
- Estvis_area

- pte_tdoa_area
- pte_tdoa_1
- readhgt
- Schau
- schmidt
- compare_alg
- filtrado_kalman
- trayectoria_2D
- trayectoria_2D1M
- trayectoria_2Dt
- trayectoria_xy

Funciones Secundarias:

- analizar_datos
- average_xg
- calc_tray_geo
- Cent2Sexa
- coord_cent
- coord_UTM
- crear_lista
- deg2degdec
- explorador_archivos
- exportar_datos
- filtro_kalman_1
- guardar_datos
- geo2utm
- mostrar_tray_xy
- mostrar_tray_xyZ
- resultados_crlb
- resultados_pte_tdoa
- rms_error
- square_error
- texto_mapa
- vdist

- ver_cobertura_xpte
- verRMS
- vreckon

Interfaces gráficas principales:

- Intro
- coordArea
- PropEst
- t_avion
- PropTX
- estimaciones_resultados
- grafico_mapa
- res_cobertura
- Res_crlb_rms
- result_estim
- result_tray

Interfaces gráficas secundarias:

- Info_t_avion
- info_tmetodo
- info_tmetodo2
- info_tmetodo3
- info_Vestim
- InfoArea
- InfoEst
- InfoPTX
- InfoResults
- InfoTraject
- letrero_calculado
- MensajeError