

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA POR MULTILATERACIÓN PARA LA AERONÁUTICA CIVIL DE CUBA

Ing. Adrian Vicedo Ramos¹, MSc. Edey Marín Álvarez² y Dr.Cs. Nelson Chávez Ferry¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE. Calle 114 # 11901 / Ciclovía y Rotonda CP 19390

Marianao, La Habana, Cuba.

²Corporación de la Aviación Cubana S.A, CACSA. Calle 23 esq. Malecón, Vedado, La Habana, Cuba

¹e-mail: avicedo@ceamat.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los sistemas de vigilancia por multilateración constituyen una tecnología de vigilancia independiente y colaborativa que determina la posición de los objetivos a través de la diferencia de tiempo de arribo (TDOA) de la señal proveniente de las aeronaves a múltiples sensores ubicados en tierra. Desde su surgimiento, las técnicas de vigilancia por multilateración han resultado de gran interés por sus múltiples ventajas operacionales y su alto desempeño en la localización de objetivos con gran precisión. Mediante el método de ensayo y error y con el empleo de herramientas informáticas, este trabajo pretende proponer varios diseños de sistemas de vigilancia por multilateración para suplir las carencias de cobertura en las zonas de proximidad de varios aeropuertos internacionales de Cuba. Para ello, resulta un factor clave la selección de los sitios más adecuados para el emplazamiento de los sensores y el despliegue de la geometría más conveniente en cada caso de estudio.

PALABRAS CLAVE: Multilateración, Diferencia de Tiempo de Arribo, Cobertura, Precisión.

ABSTRACT

Multilateration surveillance systems are independent and collaborative surveillance technology to determine position of targets through time difference of arrival (TDOA) from the received signal coming from aircrafts to multiple sensors. Since its inception, multilateration surveillance techniques have been of great interest due to their many operational advantages and their high performance in locating targets with great precision. Through the trial and error method and by using computer tools, this work intends to propose several designs of surveillance systems by multilateration to cover gaps in coverage in the proximity zones of several international airports in Cuba. For this, a key factor will be the selection of the most suitable locations to place sensors and deploy on the most convenient topology to each case study.

KEYWORDS: Multilateration, Time Difference of Arrival, Coverage, Accuracy.

INTRODUCCIÓN

La multilateración es una técnica de posicionamiento hiperbólico en la cual las señales transmitidas por los transpondedores a bordo de las aeronaves son recibidas por estaciones terrestres [1]. Los sistemas por multilateración pueden emplear las señales de respuesta de los radares secundarios (SSR), tales como los mensajes Modo A/C y Modo S, o los mensajes que periódicamente emiten los transpondedores equipados con tecnología ADS-B (“Automatic Dependent Surveillance – Broadcast”) [2]. Posteriormente en una unidad de procesamiento [3] se determina la posición de la aeronave basándose en la diferencia de tiempo de arribo (TDOA) [4] de dicha señal a cada estación.

El lugar geométrico donde el TDOA es constante con respecto a par de estaciones receptoras es una hipérbola en el plano o un hiperboloide en el espacio, cuyos focos serán dichas estaciones. La intersección entre dos hipérbolas ofrece dos soluciones, por lo que se hace necesario eliminar esta ambigüedad adicionando una tercera. La intersección de las tres ramas de hipérbola determina un punto único que representa la posición de la aeronave [5]. Con tres estaciones es posible determinar la longitud y latitud del objetivo, siendo posible obtener su posición en el espacio si se cuenta con el dato de la altura barométrica proveniente de cualquier otra fuente tal como los mensajes Modo C propios de SSR [6]. Con al menos cuatro estaciones se puede obtener la posición en tres dimensiones sin necesidad de información adicional.

Los sistemas por multilateración pueden ser pasivos o activos. En los primeros, los receptores distribuidos en tierra captan las transmisiones realizadas por las aeronaves sin la necesidad de información adicional. La información adicional se establece necesario por la multilateración activa para activar los transpondedores a bordo de la aeronave [7].

Con la solución de un sistema de ecuaciones TDOA se obtiene la posición tridimensional de una aeronave [8], en un caso donde el cálculo del TDOA está libre de errores. En la práctica, la señal proveniente de la aeronave experimenta la influencia de los efectos de los fenómenos de propagación de la onda. Además, una vez que la señal llega a los receptores, el procesamiento de esta señal de arribo se ve expuesto a los desperfectos y errores técnicos del equipamiento. Por otra parte, la refracción atmosférica, la reflexión sobre la superficie terrestre, el efecto multitrayecto, la difracción y las atenuaciones son algunos de los fenómenos que pueden influir negativamente en el cálculo preciso del TDOA. Dada la importancia de calcular con precisión el TDOA, se hace necesario una correcta sincronización de cada uno de los elementos del sistema [9]. Por otro lado, la calidad de los componentes del sistema y el algoritmo de procesamiento empleado para resolver la posición del objetivo repercute en la exactitud de la posición calculada. Por último, el despliegue de una geometría adecuada del sistema, en la cual los sitios seleccionados para el emplazamiento de los receptores sean los óptimos, constituye el factor fundamental a tener en cuenta puesto que de ello depende, en mayor medida, la precisión y la cobertura del sistema [10].

En Cuba existen aeropuertos que reciben vuelos internacionales a los que los sistemas de vigilancia por radar no ofrecen cobertura a baja altura. En la figura 1 se muestra la cobertura que ofrecen los sistemas

de radares -en color verde- a una altura de 1000 pies. En color rojo se muestran en esta figura las zonas que presentan la problemática planteada anteriormente.

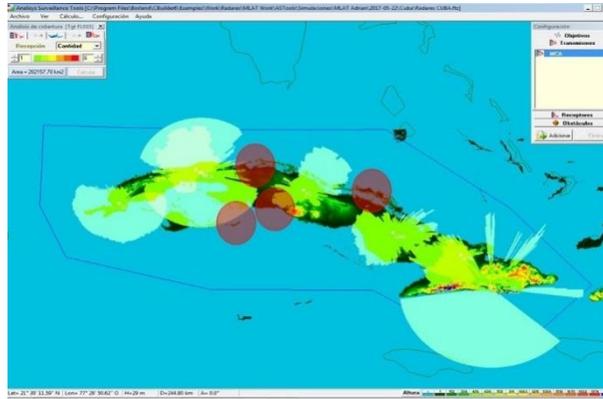


Figura 1. Cobertura de los sistemas de radares de Cuba a 1000 pies de altura.

Partiendo del empleo de mapas topográficos de alta precisión y del conocimiento de las características técnicas de los receptores, así como de la ubicación geográfica de los mismos, esta investigación se plantea como objetivo el cálculo de cobertura y de precisión de sistemas pasivos de multilateración. Los cálculos de cobertura y precisión corresponden a diseños de sistemas de multilateración que son propuestos en este trabajo como solución a la situación problemática descrita anteriormente.

Para estos casos la instalación de un sistema de radar resulta demasiado costosa y compleja en comparación con la implementación de otras tecnologías de vigilancia como ADS o los sistemas basados en multilateración [11]. La elección de los sistemas por multilateración, como la solución a la problemática planteada, se debe fundamentalmente a la necesidad de lograr un área de cobertura con alta precisión a un costo menor que un radar tradicional.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES

Para las simulaciones correspondientes al cálculo de cobertura y precisión de cada escenario propuesto ha sido empleado el software ASTool. El software ASTool ha sido propuesto en el año 2016 [12] por los autores del artículo. Dicho programa fue implementado en C++ y cuenta con un Mapa Digital de Elevaciones (MDE) obtenidos de la “Space Shuttle Radar Terrain Mapping Mission” (SRTM). El software permite modelar un escenario de vigilancia a partir de la configuración previa de los elementos que forman parte del sistema como: los transmisores, los receptores y los objetivos, teniendo en cuenta el modelo de tierra esférica y el radio equivalente de la tierra (de valor 10097373.130 m para Cuba) [13]. ASTool está destinado principalmente al cálculo de cobertura, precisión y redundancia de cualquier sistema de vigilancia. Esto mediante un algoritmo que obtiene las alturas del perfil del terreno, calcula el ángulo de cierre para las mismas y del objetivo para determinada altura; compara la potencia recibida y la sensibilidad en cada estación para determinar si la señal es detectable y finalmente poder determinar la visibilidad de la estación de vigilancia.

Para elegir la distribución espacial de los sensores se han realizado varias simulaciones que permiten verificar en el caso ideal (obviando las características del terreno) qué geometría brinda mejores resultados en cuanto al área de precisión en dependencia de la cantidad de sensores empleados. Luego,

con la realización de varias simulaciones como parte de la aplicación del método de ensayo y error, teniendo en cuenta la orografía del terreno y el índice de refracción, se determina la geometría más adecuada para cada caso de estudio. Un diseño que emplee cuatro sensores como criterio de mínimo costo, presenta el inconveniente que al fallar uno de los sensores el sistema quedaría imposibilitado de determinar la posición espacial del objetivo. En este caso es recomendable contar con sensores adicionales que garanticen la continuidad y disponibilidad del sistema.

Al aumentar el número de sensores aumenta el costo total del sistema por lo que la cantidad a utilizar debe adecuarse a las necesidades de cada escenario. En los casos que se analizan y para la aplicación en cuestión con cinco o seis sensores, se cumplen las exigencias de cobertura y precisión utilizando siempre una geometría adecuada. De las simulaciones realizadas con cinco y seis sensores para casos ideales se ha verificado que los mejores resultados en cuanto a precisión se han obtenido cuando se emplea una distribución de seis sensores en forma de dos triángulos concéntricos (variante 1) o en forma de rectángulo con dos sensores en el centro (variante 2). Dichos resultados se muestran en la figura 2.

Basado en lo anterior se ha optado por emplear en los cuatro casos de estudio que se analizan a continuación donde se emplean seis sensores. Han sido simulados varios escenarios correspondientes al aeropuerto internacional “Juan G. Gómez” de Varadero (*MLAT Varadero*), al aeropuerto internacional “Jardines del Rey” de Cayo Coco (*MLAT Cayo Coco*), al aeropuerto internacional “Vilo Acuña” de Cayo Largo del Sur (*MLAT Cayo Largo*) y al aeropuerto internacional “Jaime González” de Cienfuegos (*MLAT Cienfuegos*). Estos cuatro casos han sido destacados anteriormente en la figura 1. A continuación se procede a la descripción y análisis de cada uno.

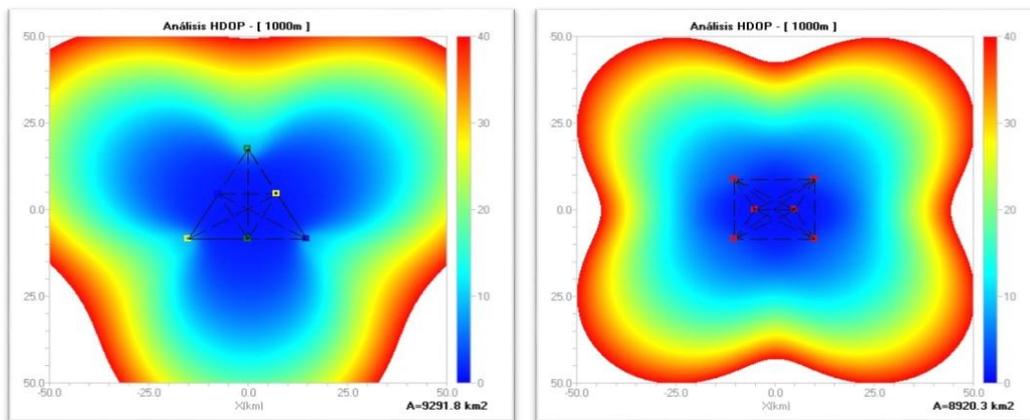


Figura 2. Área de precisión para seis sensores en forma de dos triángulos concéntricos (A) y en forma de rectángulo (B).

MLAT Varadero

Los sensores del sistema MLAT Varadero fueron distribuidos de manera aproximada a la “variante 1”. En la tabla I se pueden apreciar las coordenadas seleccionadas para la ubicación de los sensores y en la figura 3 su distribución en el terreno.

TABLA I. RELACIÓN DE SENSORES DEL SISTEMA MLAT VARADERO.

Sensor	Latitud	Longitud	Altura (m s.n.m)
TRW	23°02'17.97"N	81°26'15.80"W	86
El Pan	23°01'58.41"N	81°41'25.46"W	387
Jacán	22°49'37.56"N	81°20'43.21"W	325
Varadero	23°08'37.04"N	81°16'14.27"W	30
Rx1	22°57'20.95"N	81°19'47.92"W	259
Rx2	22°54'42.47"N	81°36'11.75"W	155

La ubicación del aeródromo y la orografía del terreno imposibilitan desplegar una geometría como la de los casos ideales simulados previamente. No obstante, se debe tratar que se asemejen a la misma en la mayor medida posible. Además, la elección de lugares altos y el empleo de mástiles para la instalación de los receptores aumentan las posibilidades de cobertura [14].

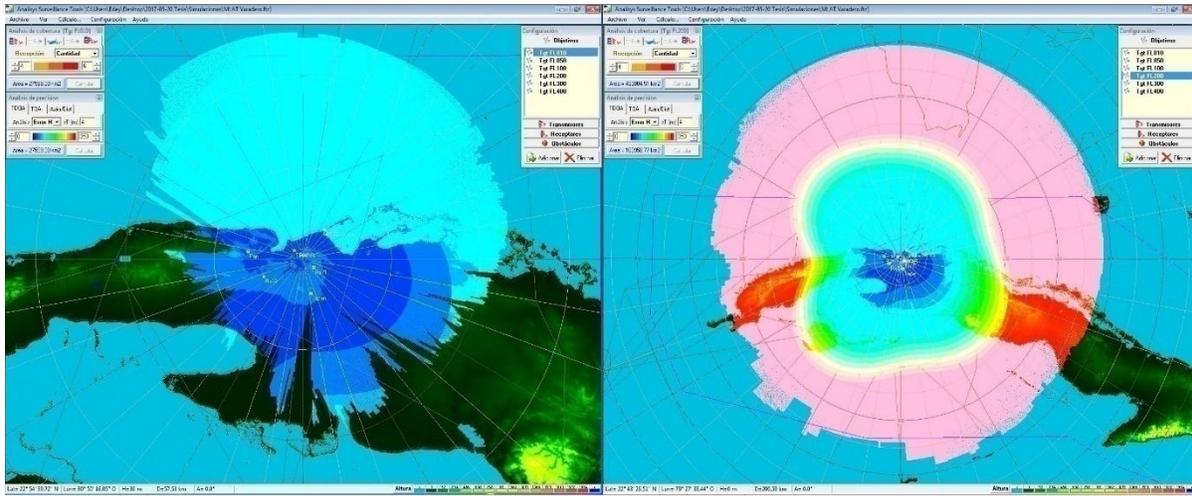
El software ASTool permite calcular la precisión del sistema dentro del área de cobertura, lo cual ahorra tiempo de procesamiento. De forma tal que la cobertura total se muestra en una escala de colores, donde el color azul representa los mayores niveles de precisión y el color rojo los peores. La figura 4A muestra la simulación correspondiente al cálculo de cobertura y precisión del sistema MLAT Varadero a 1000 pies de altura y en la misma se puede apreciar lo explicado anteriormente.



Figura 3. Distribución espacial de sensores del sistema MLAT Varadero.

Las simulaciones realizadas a 1000 pies de altura permiten constatar como el sistema propuesto brinda cobertura a toda la zona aeroportuaria y a las proximidades del aeródromo con buenos niveles de precisión. La figura 4B muestra el análisis similar para 20 000 pies de altura, donde se puede apreciar la capacidad del sistema para ofrecer vigilancia a los vuelos en ruta como parte de una aplicación de área extensa. Esto es necesario puesto que se verifica que para mayores niveles de vuelo el sistema logra

alcanzar grandes áreas de cobertura, aunque para distancias superiores a 200 km la precisión comienza a disminuir.



A

B

Figura 4. Cobertura y precisión del sistema MLAT Varadero a 1000 pies (A) y 20000 pies (B) de altura.

MLAT Cayo Coco

El sistema MLAT Cayo Coco presenta una distribución de sensores aproximada a la “variante 2”. Las coordenadas geográficas y la distribución espacial de sensores se pueden apreciar en la tabla II y figura 5 respectivamente.

En este caso existe el inconveniente que el aeropuerto se encuentra ubicado en un cayo que al norte limita con el mar, por lo que es imposible la ubicación de sensores hacia esta zona. No obstante, en el diseño propuesto, dos sensores se ubicaron en los puntos más alejados al norte posibles para garantizar una geometría adecuada que logre buenos niveles de cobertura y precisión para las proximidades del aeródromo. Esto se analiza para un área más amplia que se extiende a lo largo de una parte considerable de la Región de Información de Vuelo (FIR) como se muestra en la figura 6.

TABLA II. RELACIÓN DE SENSORES DEL SISTEMA MLAT CAYO COCO.

Sensor	Latitud	Longitud	Altura (m s.n.m)
Terminal	22°27'57.40"N	78°19'46.00"W	15
HotColonial	22°32'47.90"N	78°22'36.21"W	15
Rx1	22°06'19.30"N	78°25'15.87"W	338
Faro	22°28'55.40"N	78°09'59.00"W	15
Rx2	22°16'55.34"N	78°36'30.65"W	100
Rx3	22°13'54.01"N	78°28'11.87"W	19

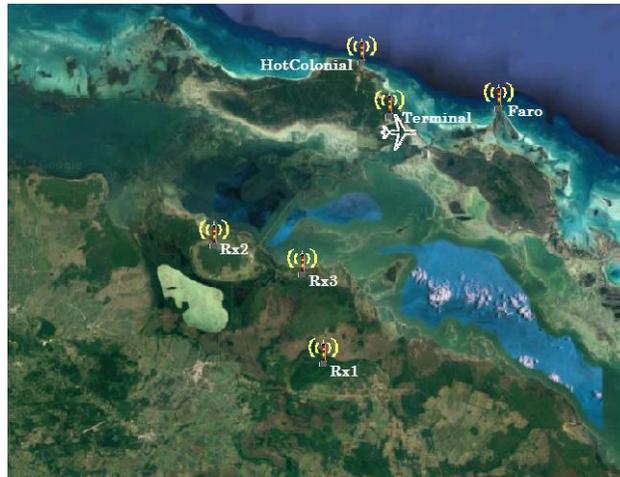
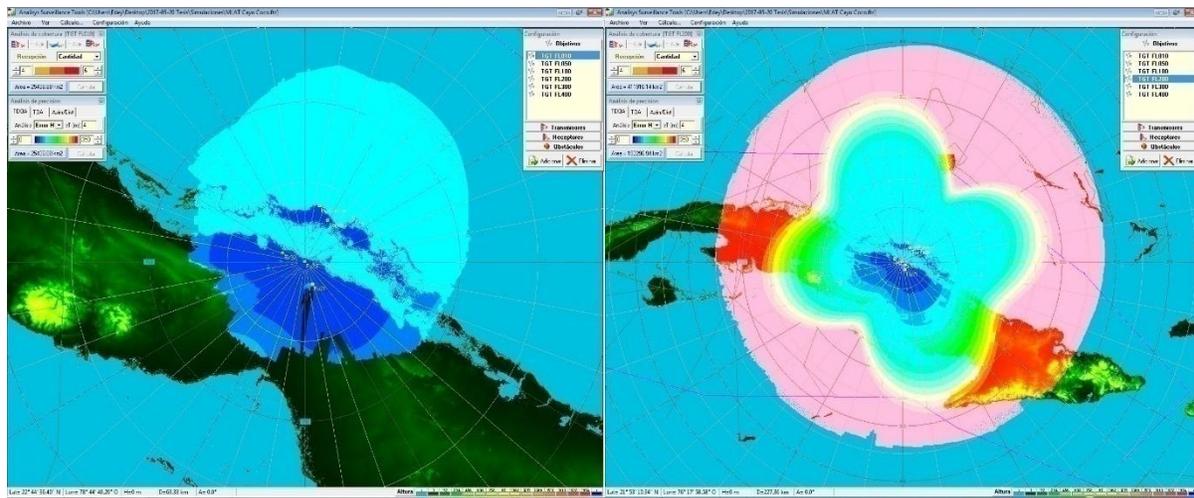


Figura 5. Distribución espacial de sensores del sistema MLAT Cayo Coco.



A

B

Figura 6. Cobertura y precisión del sistema MLAT Cayo Coco a 1000 pies (A) y 20000 pies (B) de altura.

MLAT Cayo Largo

El escenario propuesto para MLAT Cayo Largo tiene una configuración similar a la “variante 1”. Las coordenadas geográficas y la distribución espacial de sensores se pueden apreciar en la tabla III y figura 7 respectivamente.

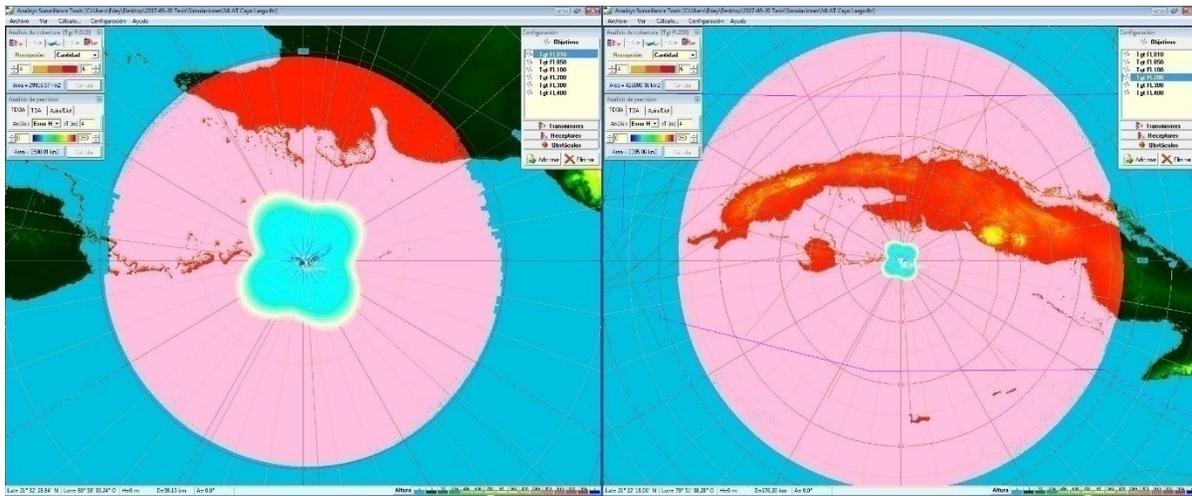
TABLA III
RELACIÓN DE SENSORES DEL SISTEMA MLAT CAYO LARGO

Sensor	Latitud	Longitud	Altura (m s.n.m)
Playa Sirena	21°36'10.64"N	81°33'58.68"W	22
HotSolPel	21°36'05.30"N	81°31'24.79"W	18
Norte	21°37'31.05"N	81°32'25.62"W	21
Rx1	21°37'55.14"N	81°30'57.98"W	26
Rx2	21°35'30.53"N	81°32'24.53"W	21
Rx3	21°38'16.10"N	81°33'54.92"W	21



Figura 7. Distribución espacial de sensores del sistema MLAT Cayo Largo.

En este caso, al estar el aeródromo ubicado en un cayo rodeado de agua en todas direcciones, los lugares para la ubicación de los sensores son limitados. En un escenario de este tipo la topología de un sistema por multilateración es pequeña, puesto que las distancias entre las estaciones también lo son. Como consecuencia, los mejores niveles de precisión, que se encuentran dentro de la geometría de este sistema, están presentes prácticamente en el área del aeródromo, como se aprecia en la figura 8.



A **B**
Figura 8. Cobertura y precisión del sistema MLAT Cayo Largo a 1000 pies (A) y 20000 pies (B) de altura.

Para mayores niveles de vuelo se puede notar en la figura 8B como aumenta la cobertura del sistema dado que no existen obstáculos que la afecten. Sin embargo, los mejores niveles de precisión continúan enmarcados dentro de la geometría del sistema.

MLAT Cienfuegos

El escenario propuesto para el sistema MLAT Cienfuegos tiene una configuración similar a la “variante 1”. Las coordenadas geográficas y la distribución espacial de sensores se pueden apreciar en la tabla IV y figura 9, respectivamente.

TABLA IV. RELACIÓN DE SENSORES DEL SISTEMA MLAT CIENFUEGOS.

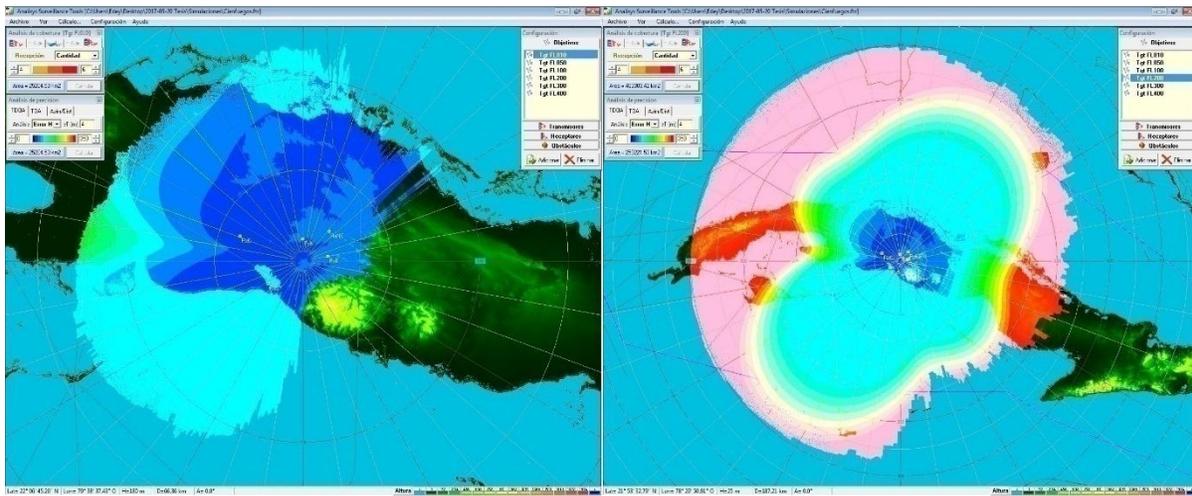
Sensor	Latitud	Longitud	Altura (m s.n.m)
RxS	22°05'09.11"N	80°28'13.16"W	65
San Juan	21°59'21.13"N	80°08'48.17"W	1086
RxN	22°18'29.30"N	80°16'56.87"W	151
RxNE	22°20'41.85"N	80°08'11.86"W	161
RxO	22°19'18.03"N	80°37'33.02"W	70
RxE	22°13'20.24"N	80°08'34.79"W	266

La geometría desplegada en este caso se acerca bastante a la configuración ideal por lo que los resultados de las simulaciones, mostrados en la figura 10, en cuanto al cálculo de cobertura y precisión son satisfactorios. A 1000 pies de altura se puede apreciar como dentro del área de cobertura se logran elevados niveles de precisión, aunque dicha cobertura se ve obstaculizada en la dirección sureste por la presencia de una gran elevación del terreno. Para alturas mayores se alcanza una gran cobertura con alta precisión pudiéndose utilizar el sistema para la vigilancia de ruta.

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA POR MULTILATERACIÓN PARA LA AERONÁUTICA CIVIL DE CUBA.



Figura 9. Distribución espacial de sensores del sistema MLAT Cienfuegos.



A

B

Figura 10. Cobertura y precisión del sistema MLAT Cienfuegos a 1000 pies (A) y 20000 pies (B) de altura.

CONCLUSIONES

Cada uno de los sistemas propuestos tiene como objetivo brindar cobertura en las proximidades del aeródromo con buenos niveles de precisión, en lo que se conoce como área terminal. Las simulaciones realizadas permiten constatar como los diseños propuestos cumplen con buenos resultados estos objetivos. En los casos de MLAT Varadero, MLAT Cayo Coco y MLAT Cienfuegos la geometría desplegada permite que puedan ser considerados para aplicaciones de área más extensa (esto se puede apreciar en simulaciones mayores alturas) pero sin llegar a alcanzar las distancias a las que un sistema de radar puede ofrecer cobertura. Además, para distancias superiores a los 200 km la precisión de los sistemas disminuye considerablemente. En el escenario de MLAT Cayo Largo, brinda gran precisión en una pequeña porción de la cobertura que ofrece por lo que su aplicación se limita a la vigilancia de vuelos a baja altura en las proximidades aeroportuarias.

Puesto que Cuba es una isla larga y estrecha las ubicaciones para los sensores están limitadas. El despliegue de una topología más adecuada se logra cuando las distancias entre los sensores son mayores, dentro del límite permisible, dado por la visibilidad directa entre cada uno de ellos, lo que permite lograr mejores resultados en la cobertura y en la precisión del sistema. Cuando los sensores no pueden alejarse lo suficiente entre sí, el área con mayor precisión dentro de la cobertura es limitada, a pesar de que no haya obstáculos de por medio.

En cada simulación se evidencia como la ubicación de los sensores sobre las elevaciones del terreno favorece la obtención de mayores niveles de cobertura de un sistema. Se pudo constatar que la topología óptima a lograrse con seis sensores consiste en dos triángulos concéntricos, anteriormente ejemplificados. Lo cual posibilita además que el sistema tenga redundancia.

A pesar que un sistema con redundancia implica sensores adicionales y, por tanto, un mayor costo económico del sistema y mayor despliegue de infraestructura, su empleo permite que el sistema continúe operativamente funcional al presentarse problemas imprevistos en los sensores. Con esto se garantiza la continuidad del servicio manteniendo los niveles de seguridad de los vuelos.

Las ideas expuestas anteriormente como resultado del análisis de las simulaciones, permiten concluir que los sistemas de vigilancia por multilateración constituyen una alternativa viable para suplir las insuficiencias presentadas por la vigilancia aeronáutica civil de nuestro país. Los ejemplos de posibles sistemas a instalar, reflejados en este trabajo, son una prueba de ello. La figura 12 muestra cómo resultaría la cobertura de nuestro país a 1000 pies de altura teniendo en cuenta las estaciones de radar (en color verde) y los sistemas por multilateración propuestos (en color rojo).

REFERENCIAS

- [1] F. J. J. Fernández, "Estudio sobre los sistemas CNS/ATM : situación actual y evolución futura.," Universitat Politècnica de València, 2015.
- [2] OACI, "Multilateration (MLAT) Concept of use.," ed, 2007.

- [3] EUROCAE, "ED-117: Minimum Operational Performance Specification for Mode S Multilateration Systems for Use in Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS)," ed, 2011.
- [4] OACI, "Guidance Material on Comparison of Surveillance Technologies (GMST)," ed, 2007.
- [5] I. A. M. Gaviria, "New strategies to improve multilateration systems in the air traffic control," Editorial Universitat Politècnica de València, 2013.
- [6] W. Neven, T. Quilter, R. Weedon, and R. Hogendoorn, "Wide area multilateration," *Report on EATMP TRS*, vol. 131, p. 1, 2005.
- [7] J. J. Abbud Momma, "Localización y seguimiento de aeronaves mediante sistemas de multilateración de área extensa," *Telecomunicacion*, 2015.
- [8] M. L. Ivan A. Mantilla Gaviria, Gaspare Galati, Juan V. Balbastre-Tejedor and Elias de los Reyes Davo, "Efficient location strategy for airport surveillance using Mode-S multilateration systems," 2012.
- [9] V. M. Quintana, "Desarrollo de un simulador de sistemas de multilateración para vigilancia aérea en TMA," *Universitat Politècnica de València*, 2017.
- [10] M. L. G. Galati, and M. Tosti, "Multilateration (Local and Wide area) as a distributed sensor system: Lower bounds of accuracy," in *European Radar Conference, EuRAD, Amsterdam*., 2008.
- [11] R. Beason, *A new multilateration optimization technique for air traffic management and surveillance*: The University of Oklahoma, 2007.
- [12] E. Marín Álvarez, "Evaluación de la cobertura y la precisión de los sistemas de vigilancia aeronáutica por multilateración para cualquier región del territorio de Cuba.," *Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"*, 2016.
- [13] J. R. Sandianes Gálvez, *Propagación de las Ondas de Radio (POR)*, 2015.
- [14] EUROCAE, "ED-142: Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) Systems," ed, 2010.