

Diseño de un Sistema de Vigilancia Aeronáutica para TMA de Santiago de Cuba

Design of an Aeronautic Surveillance System for TMA Santiago

Ing. María E. Zulueta Jiménez^{1*}, Dr.C.T. José A. Rodríguez Rojas², Ing. Libán Tellez Casas³

Recibido: 12/2021 | Aceptado: 02/2022

Palabras clave

Vigilancia aeronáutica
Área de maniobra de terminal
Fusión de datos

Resumen

La región oriental de la isla de Cuba está comprendida dentro del TMA Santiago, en el cual existe un sostenido aumento del flujo del tráfico aéreo al contar con dos aeropuertos internacionales. Esta zona del país presenta una compleja orografía, y los sistemas de vigilancia instalados no son capaces de garantizar cobertura a diferentes niveles de vuelo. Con el desarrollo a nivel mundial de tecnologías de vigilancia como la Multilateración y la Vigilancia Dependiente Automática por Radiodifusión, se ha podido lograr la fusión de los datos recopilados por las mismas con los ofrecidos por los sistemas de radar; para así cumplir de manera eficiente con los requerimientos de la OACI que se exigen actualmente para el cumplimiento de sus misiones. En esta investigación se persigue analizar la fusión de los datos ofrecidos por estas técnicas de vigilancia, para proponer un nuevo sistema que brinde un mayor volumen de cobertura al TMA Santiago, y sea superior en cuanto a precisión, exactitud y redundancia, con respecto al que se encuentra desplegado en estos momentos.

Keywords

Aeronautic surveillance
Terminal maneuvering area
Data fusion

Abstract

The eastern area of the island of Cuba is included in the TMA (Terminal Maneuvering Area) Santiago, where there is an ongoing increase of the air traffic flow for having two international airports. This part of the country has a complex orography, and the installed surveillance systems are not able to ensure the coverage at different flight levels. With the worldwide development of surveillance technologies as Multilateration and Surveillance Dependent Automatic-Broadcast, the integration of the collected data from these systems together with those provided by radar systems has been achieved; so as to efficiently meet the requirements established by the International Civil Aviation Organization (ICAO) currently required for carrying out tasks. This research is intended to assess the data integration provided by

1* Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. ETECSA. Cuba. mariaelena.zulueta97@gmail.com

2 Empresa Cubana de navegación Aérea, ECNA, Cuba, jose.rodriguez@aeronav.avianet.cu

3 Empresa Cubana de navegación Aérea, ECNA, Cuba, libancuba37@gmail.com

these surveillance techniques, in order to propose a new system providing greater coverage volume to the TMA Santiago and superior, in terms of accuracy, precision and redundancy, to the one already deployed today.

Introducción

En la actualidad la circulación aérea debe tener en cuenta disímiles factores para compatibilizar las trayectorias de todas las aeronaves en un mismo espacio y tiempo. Con el incremento de las demandas, aumenta la complejidad de este proceso. Por ello se le debe dar respuesta a los nuevos retos que representan para la Gestión de Tráfico Aéreo, ATM —*Air Traffic Management*—, el crecimiento del número de aeronaves, integración de vehículos no tripulados en espacio aéreo no segregado y seguridad de vuelo; mediante el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de las Comunicaciones, Navegación y Vigilancia.

El tipo de tecnología de los sistemas de vigilancia ha cambiado radicalmente desde los primeros tiempos de las aerolíneas comerciales, cuando la radio era la forma de comunicación por excelencia entre los pilotos y controladores de tránsito aéreo. Actualmente las tecnologías insertadas en los sistemas de vigilancia, es un equipamiento de sensores emisores de base en tierra y a bordo de las aeronaves; además de los sistemas de fusión de datos en el Centro de Control de Tránsito Aéreo, ATCC —*Air Traffic Control Centre*—.

Los sistemas ADS-B —*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*— y Multilateración (MLAT), son dos métodos de vigilancia aérea cuyo objetivo es mejorar e incrementar la capacidad de observación de las operaciones llevadas a cabo en entornos aeroportuarios. Cada proveedor de servicios de navegación aérea utiliza los medios tecnológicos que tiene a su alcance para optimizar la separación de aeronaves y, con ello, conseguir la máxima capacidad de vuelos en aproximación y una buena gestión del tránsito en tierra. En este sentido, las estrategias de vigilancia empleadas no son universales, sino que dependen de la cantidad de tráfico aéreo existente y de su tipología.

Ambas tecnologías son aplicables para la vigilancia del área de maniobra de la terminal, TMA —*Terminal Maneuvering Area*— y para la vigilancia en ruta, donde algunos proveedores han optado por ins-

tales sistemas de Multilateración de Área Extendida, WAM —*Wide Area Multilateration*—, cuya principal ventaja es su capacidad de procesar datos procedentes de todo tipo de transpondedores.

En el TMA de Santiago de Cuba se requiere diseñar un sistema de vigilancia aeronáutica, y así reemplazar los radares encargados de la vigilancia de las aeronaves en dicho terminal. Pues tras años de desgaste y explotación, ya los mismos no cumplen de manera eficiente su trabajo; siendo costoso e insostenible su mantenimiento, además que presentan dificultades para detectar y vigilar aeronaves a muy bajas alturas. Imposibilitando así, dar una adecuada respuesta a los nuevos requerimientos de la OACI.

Materiales y métodos

Para la realización de esta investigación se consultaron las bibliografías recientes referentes a los sistemas de vigilancia aeronáutica empleados a nivel mundial y en Cuba; analizando con detenimiento su evolución y rendimiento en los últimos años. Se realizó un estudio del terreno comprendido dentro del Área de Maniobra de Terminal, TMA —*Terminal Maneuvering Area*— para obtener un óptimo diseño de dicho sistema; además, el mismo fue simulado en los *software AsTools* y *Radio Mobile*.

Sistemas de vigilancia aeronáutica

Los sistemas de vigilancia aeronáutica se proporcionan a través de las instalaciones y servicios, para determinar las posiciones respectivas en tiempo real de las aeronaves, que operan en el entorno aeroportuario con el fin de establecer una distancia segura de separación entre las mismas. Es decir, la vigilancia comprende todos los medios tecnológicos necesarios para proporcionar al sistema de Control de Tráfico Aéreo, información de posición y otros datos esenciales, incluyendo información meteorológica y de las situaciones de tráfico tanto en el aire como en tierra (Moreno, 2017).

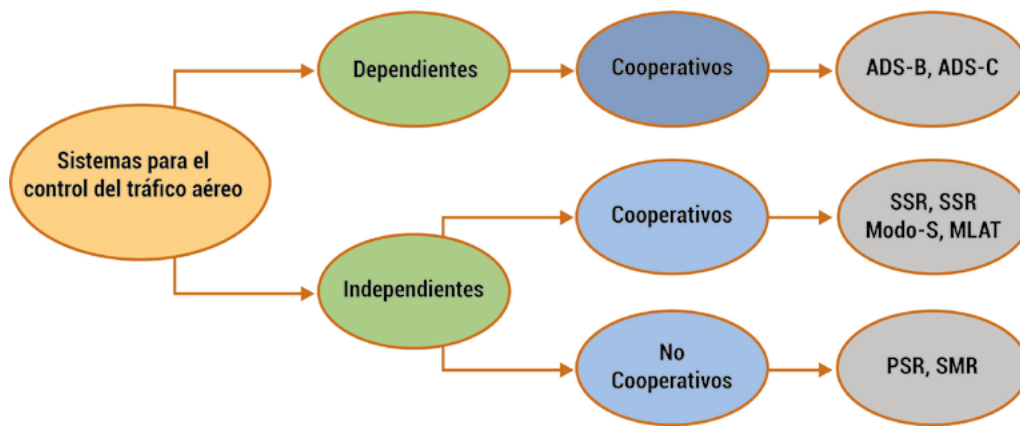


Figura 1. Clasificación de sistemas para ATC

Para el Control de Tráfico Aéreo los sistemas de vigilancia aeronáutica (figura 1) se dividen en tres subsistemas secuenciales, que se diferencian bien entre sí para el tratamiento de la información: el subsistema embarcado, equipos que se ubican en las aeronaves o vehículos para nutrir de información al sistema; el subsistema sensorial, se instala en tierra, aunque pueden existir sensores equipados en aeronaves y vehículos, su función es detectar y proveen información a cada centro de ATC; y el subsistema de control, ubicado en centros informatizados de tratamiento de información, este subsistema detecta y alerta de fallos en el sistema o en los artefactos, además de ayudar a la toma de decisiones en la navegación.

Estos sistemas de vigilancia se agrupan en dos categorías: dependientes o independientes. Los sistemas dependientes determinan su posición de forma conjunta mediante el establecimiento de comunicación

entre la aeronave y la estación en tierra; mientras que en los sistemas independientes la posición se obtiene solamente con las mediciones que se realizan en tierra. Otra clasificación es en cuanto a cooperatividad, definiéndose como colaborativos cuando la aeronave emite algún tipo de señal para que el sistema de vigilancia logre su detección; y siendo no colaborativos en el caso contrario. La figura 2 resume lo antes descrito:

Dependiendo de los requerimientos necesarios se utilizan diversos métodos para la vigilancia aeronáutica como el Radar Primario de Vigilancia PSR —*Primary Surveillance Radar*—, el Radar Secundario de Vigilancia, SSR —*Secondary Surveillance Radar*—, la Vigilancia Dependiente Automática, ADS —*Automatic Dependent Surveillance*—, la Multilateración (MLAT) y la Multilateración de Área Extendida (WAM).

a) Embarcado (Transpondedor)

b) Sensorial (Antena Rx/Tx de MLAT)

c) Control (Radar de Tráfico Aéreo)



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Subsistemas de vigilancia aeronáutica

Radar secundario de vigilancia SSR

El Radar Secundario de Vigilancia, SSR — *Secondary Surveillance Radar*—, se basa en una respuesta del objetivo, es decir, que la estación en tierra que inicia el proceso “interroga” y el objeto “responde”. A diferencia de los radares

primarios, el blanco debe ser cooperativo para poder ser detectado.

En el caso de una aeronave, esta debe estar equipada con un transpondedor (transmisor – receptor) y recibir una señal codificada del interrogador del radar. La respuesta activa se genera en el transpondedor, que se codifica y se envía de nuevo al radar secundario. Esta respuesta contiene mucha información, por ejemplo: la altitud, la identificación de la aeronave o los problemas técnicos a bordo, como el fallo de la radio.

Los radares secundarios están conformados por un Interrogador, que es una estación terrestre, y de un transpondedor, equipo a bordo de la aeronave; lo que proporciona un enlace de datos de dos vías, con frecuencias de transmisión y recepción distintas. La OACI ha definido que en todo el mundo las transmisiones se hagan solo en las frecuencias de 1030 MHz (uplink) y 1090 MHz (downlink). Esta estructura básica se observa en la figura 3 (Espín, 2008).

Cálculo del alcance del SSR

Para realizar el cálculo aproximado del alcance máximo ascendente, nos apoyaremos en la ecuación (1), que describe el alcance del radar en términos de decibeles.

$$P_{RxTransp} = P_{TxSSR} + G_{TxSSR} - L_{TxSSR} - L_b + G_{RxTransp} - L_{RxTransp} \quad (1)$$

donde el receptor es el transpondedor y el transmisor es el radar. En este caso la P_{TxSSR} oscila entre 1kW y 2kW; para la realización de este análisis se escoge un valor de $P_{TxSSR} = 1.3 \text{ kW}$ que equivale a 61.14 dBm, una ganancia de la antena transmisora (G_{TxSSR}) de 25 dBi y se considerará el máximo valor de pérdidas del cableado de 8.2 dB.

Según el Anexo 10 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional del 2007, para los parámetros del receptor se tiene que la sensibilidad de un transpondedor varía de -69 a -77dBm, se utilizará el valor mínimo; además se considerarán la ganancia de recepción 0 y las pérdidas del cableado de 3 dB.

Al sustituir los valores escogidos en la ecuación 1:

$$-69 \text{ dBm} = 61.14 \text{ dBm} + 25 \text{ dBi} - 8.2 \text{ dB} - L_b + 0 \text{ dBi} - 3 \text{ dB}$$

Es posible calcular su máximo radio de alcance ascendente, si se despeja el valor de las pérdidas en el

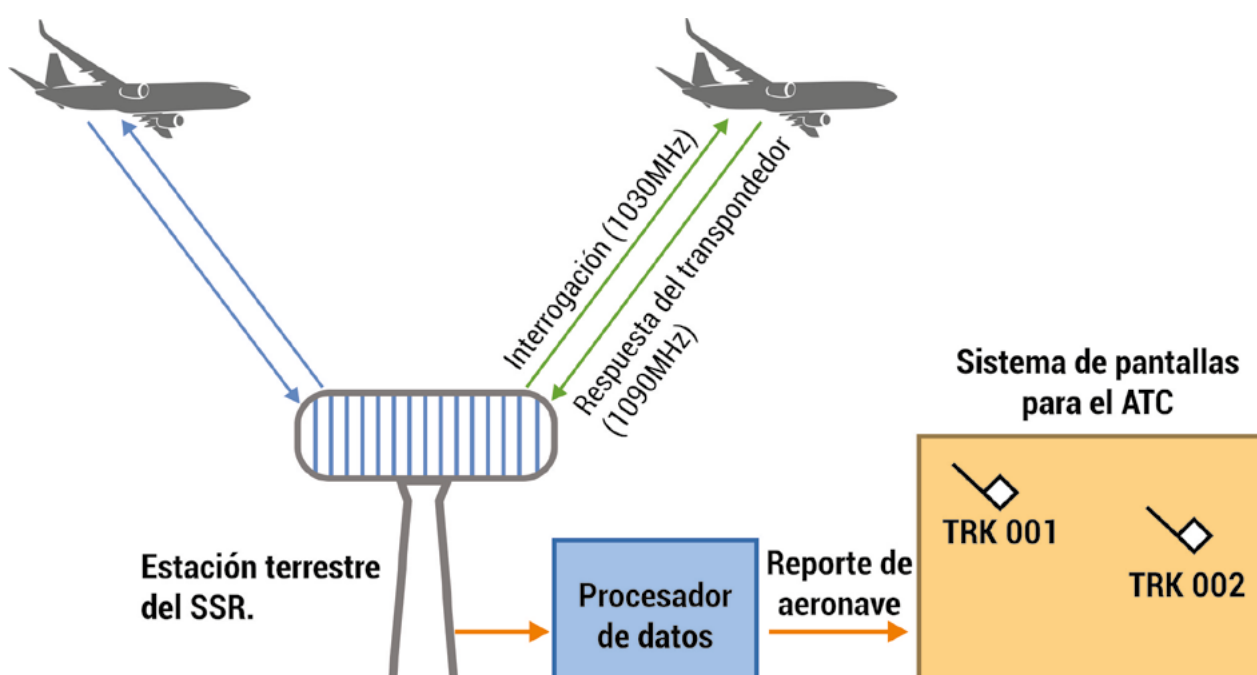


Figura 3. Estructura de un sistema SSR

espacio libre, único factor que depende directamente de la distancia del radar a la aeronave:

$$L_b = 143.94 \text{ dBm}$$

Es posible determinar el alcance mediante la ecuación (2):

$$L_b = 92.45 + 20\log[f(\text{GHz})] + 20\log[d(\text{km})] + A_{\text{oxig}} * d(\text{km}) + A_{\text{vap}} * d(\text{km})$$

(2)

Donde

$$A_{\text{oxig}} = 5.31 * 10^{-3} \text{ dB/km}$$

$$A_{\text{vap}} = 4.6 * 10^{-6} \text{ dB/km}$$

Luego, sustituyendo estos valores en (2) se obtiene:

$$d(\text{km}) = 303 \text{ km}$$

Del análisis efectuado, con los valores seleccionados y para una sensibilidad mínima de -69 dBm, se concluye que la cobertura del enlace ascendente es de 303 km, equivalentes a 163 NM. La figura 4 visualiza la dependencia que existe entre la distancia y la sensibilidad del receptor; aunque estos valores pueden variar. Se señala el punto donde la sensibilidad corresponde con el valor seleccionado para efectuar este análisis.

Para el cálculo aproximado del alcance del radar secundario en el caso del enlace descendente, se debe tener en consideración lo planteado por la Comisión Radiotécnica para la Aeronáutica en (RTCA, 2011), que la potencia de transmisión de la aeronave depende de la altura a la que vuela:

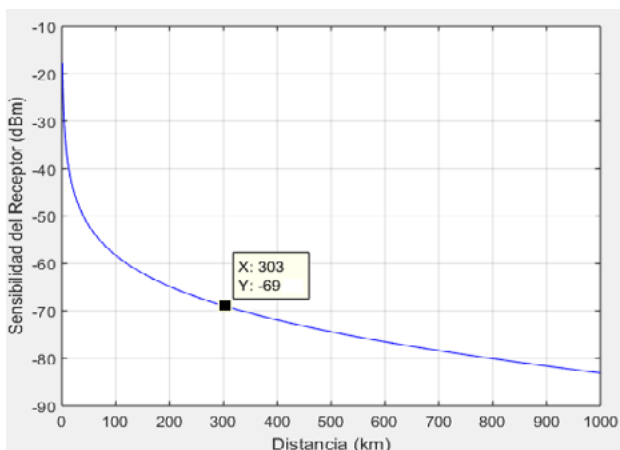


Figura 4. Distancia vs Sensibilidad enlace ascendente

Aeronaves destinadas a operar por encima de 15000 pies y que su velocidad máxima supera los 175 Kts, transmiten una potencia de 125W que equivalen a 21dBW.

Aeronaves destinadas a operar por debajo de 15000 pies y que su velocidad máxima no excede los 175 Kts, transmiten una potencia de 70W que equivalen a 18.5dBW.

Esto hace necesario realizar el análisis en dos escenarios diferentes de trabajo. Donde se utilizará una sensibilidad del receptor igual a -85 dBm, tomando como base lo planteado en (OACI, 1999); una ganancia de la antena receptora igual cero (peor caso) y pérdida del cableado de 3dB. En el caso de transpondedor se considerará: $G_{TxTransp}$ de 4.5 dB; ganancia que aporta el módulo del filtro-amplificador de 14 dB y las pérdidas del cableado atenúan la señal 5 dB.

Se considerará de igual forma que en el enlace anterior y se obtienen los valores de atenuación del oxígeno y vapor de agua:

$$A_{\text{oxig}} = 5.62 * 10^{-3} \text{ dB/km}$$

$$A_{\text{vap}} = 5.164 * 10^{-6} \text{ dB/km}$$

Sustituyendo los valores escogidos en la ecuación (3):

$$P_{RxSSR} = P_{TxTransp} + G_{TxTransp} - L_{TxTransp} - L_b + G_{RxSSR} - L_{RxSSR} \quad (3)$$

Resulta que para las aeronaves con un nivel de vuelo superior a los 15000 pies es de 365 km (197 NM); y para las que vuelan por debajo de los 15000 pies la distancia máxima es de 288 km (156 NM).

La figura 5 muestra la dependencia que existe entre la distancia y la sensibilidad del receptor para los dos casos del enlace descendente; se han señalado los puntos donde la sensibilidad coincide con los valores seleccionados en este análisis.

Vigilancia Dependiente Automática-Radiodifusión

El sistema de Vigilancia Dependiente Automática – Radiodifusión, ADS-B —Automatic Dependent Surveillance-Broadcast— es una técnica de vigilancia aérea que transmite información en forma cooperativa.

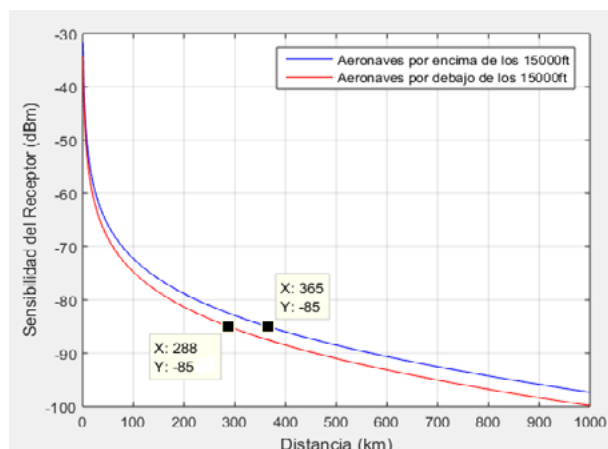


Figura 5. Distancia vs Sensibilidad enlace descendente

Es automático pues emite los mensajes sin intervención humana y es dependiente porque utiliza información brindada por sistemas de geolocalización. La información emitida en forma de *broadcast* es recibida por receptores en superficie y por aeronaves dentro del área de vuelo de la aeronave emisora, *air-to-air communication*; proporcionando así conocimiento de la situación y autoseparación entre las aeronaves.

Este sistema de vigilancia posee tecnologías para la emisión-recepción, las cuales se conocen comúnmente como ADS-B IN y ADS-B OUT.

Los sistemas ADS-B poseen bajo costo de mantenimiento pues no requieren elementos móviles. Elevada tasa de refresco de la información (entre un segundo y medio segundo como promedio). Permite realizar control de tráfico aéreo en áreas sin cobertura radar o donde no es rentable o posible instalar un SSR; y realiza un uso óptimo del espectro radioeléctrico dado que no transmite ninguna información hacia las aeronaves.

Cálculo del alcance de un sistema ADS-B

En este análisis, al igual que en el cálculo de cobertura del SSR, se tienen dos escenarios que están en dependencia del nivel de vuelo. Para el cálculo de la cobertura de un sistema ADS-B intervienen factores tanto geográficos como energéticos; y para el enlace entre la aeronave y la estación terrena ADS-B se utilizarán las mismas ecuaciones de balance energético ya explicadas.

Para el transpondedor se considerará la ganancia de la antena transmisora de 5dB, y el que el módulo filtro-amplificador aporta una ganancia de 12dB. En

este caso las pérdidas del cableado atenúan la señal 3.5 dB. Como nuevo parámetro que interviene en este cálculo aproximado se tiene la sensibilidad de las estaciones receptoras, que en este caso se trabajará con un valor de -96 dBm.

Al intercambiar estos nuevos valores de sensibilidad del receptor y pérdidas del cableado en la ecuación (1), se pueden obtener las pérdidas en el espacio libre:

$$L_b = 155.5 \text{ dBm}$$

Se calcula la distancia máxima que puede existir entre la aeronave y la estación base mediante la ecuación (2), sustituyendo los valores de atenuación del oxígeno y el vapor de agua por los ya obtenidos para enlaces a una frecuencia de 1090MHz.

$$d(\text{km}) = 784 \text{ km}$$

El alcance de esta estación para aeronaves que vuelen por encima de 15000 pies es de 784 km, que corresponden a 423 NM.

Para el segundo escenario, las aeronaves que vuelan por debajo de los 15000 pies, las pérdidas en el espacio libre son de:

$$L_b = 153 \text{ dBm}$$

Resultando un alcance máximo de 644 km, lo que equivalen a 348 NM. La figura 6 visualiza la dependencia que existe entre la distancia y la sensibilidad del receptor para los dos casos del enlace descendente en la tecnología ADS-B; se han señalado los puntos donde la sensibilidad coincide con los valores seleccionados en este análisis.

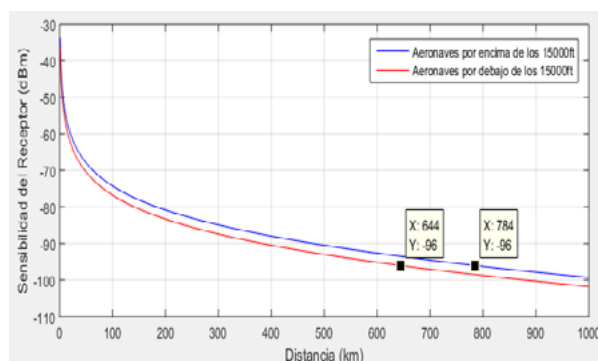


Figura 6. Distancia vs Sensibilidad enlace descendente para el sistema ADS-B

Sistemas de multilateración

La multilateración (MLAT) es una técnica de vigilancia utilizada en la gestión del tráfico aéreo, que consiste en determinar la ubicación de una aeronave a través de la medición de distancias empleando un sistema de receptores distribuidos en un área determinada.

También conocida como posicionamiento hiperbólico, las señales transmitidas por los transpondedores a bordo de las aeronaves son recibidas por estaciones terrestres. Estas aeronaves pueden ser identificadas y posicionadas mediante algoritmos de geolocalización si son equipadas con un transpondedor SSR, SSR Modo A, C, o S y capacidad ADS-B OUT y emplean el cálculo de la diferencia de tiempo de arribo (TDOA) para determinar la posición de la aeronave.

La esencia de los sistemas MLAT es que suministran una sutil transición a la Vigilancia automática dependiente por radiodifusión (ADS-B) mediante el uso de la misma infraestructura de tierra. Consta de una serie de antenas para recepción de la señal proveniente de una aeronave, y una unidad central de procesamiento para calcular la posición del avión con la diferencia de tiempo de arribo (TDOA) de la señal en las diferentes antenas (Vicedo, 2017).

Fusión de datos de múltiples sensores

La tarea de un proceso de fusión de datos de múltiples sensores, MSDF —*Multi-Sensor Data Fusion*— es estimar las características del objetivo a partir de los datos de vigilancia proporcio-

nados por un conjunto de sensores. Esto implica la evaluación, comparación y fusión de dichos datos de medición basados en decisiones de hipótesis múltiples (a menudo probabilísticas), tomadas en parámetros como la proximidad espacial del objetivo, la velocidad, rumbo, identificación y clasificación del mismo.

MSDF procesa no solo la entrada de datos de radares, sino también datos de ADS-B MLAT, GBAS; lo que le permite producir pistas del sistema para otras aplicaciones en el control de tráfico aéreo. Pero su mayor problema a resolver consiste en cómo extraer y utilizar de manera exitosa la información contenida en múltiples series de datos, con el objetivo de estimar procesos o parámetros desconocidos.

Para esta fusión de datos, algunos proveedores han optado por el empleo de un rastreador multi-sensor —*Multi-sensor tracking*—, el cual fusiona datos de varias fuentes para producir una única pista del sistema. Los datos deben fusionarse, formando una pista de sistema de sensores múltiples que representa la estimación consolidada de la posición física de la aeronave.

La fusión debe contemplar las tasas de actualización de las diversas fuentes de datos; la integridad de los datos posicionales recibidos y los parámetros relevantes de aeronaves con enlace descendente (DAP).

En la figura 7 se puede visualizar un escenario donde están fusionados tres sistemas de vigilancia: Radar, ADS-B y WAM. Que utilizan un rastreador

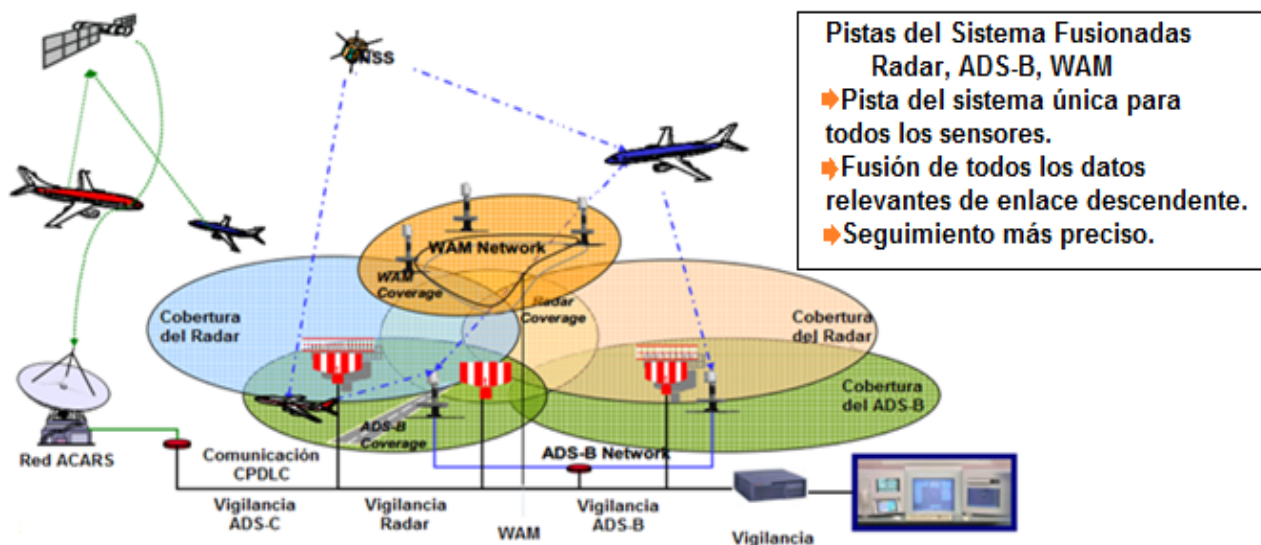


Figura 7. Escenario de varios sistemas de vigilancia fusionados (THALES, 2010)

multi-sensor para lograr fusionar los datos de varias fuentes y de esta forma producir una única pista.

El resultado final de esta fusión se visualiza en la pantalla de los controladores.

Diseño de un sistema de vigilancia para el TMA Santiago

En el diseño del sistema de vigilancia aeronáutica propuesto para el TMA de Santiago de Cuba se propone emplear múltiples sensores de diferente funcionalidad para proveer mayor seguridad y cobertura. Estará compuesto por: dos sistemas MLAT (uno en Holguín y otro en Santiago), un radar de vigilancia secundario (SSR) en la Gran Piedra y un sistema ADS-B en el Yunque de Baracoa. La figura 9 muestra su ubicación en el mapa:

El sistema MLAT-Holguín se propone que esté distribuido en la superficie del aeródromo del aeropuerto internacional Frank País; constituido por 8 estaciones para así garantizar la visualización de la aeronave en tres dimensiones. Por otro lado, para garantizar la vigilancia en ruta, se propone una red WAM conformada por 4 estaciones con diseño en forma de rombo centrado en el aeropuerto. En la figura 10 se puede visualizar su distribución.

Para el diseño del sistema MLAT-Santiago se propone una distribución de 6 estaciones alrededor de la pista que permitan la eficaz visualización de la aeronave; además de poseer visibilidad entre las mismas. En el caso de la red WAM, se consideró que el aeropuerto "Antonio Maceo" se encuentra localizado en la costa sur de la región oriental, lo que imposibilita la colocación de estaciones al sur del mismo. Esta red WAM se propone que cuente con 3 estaciones, con una geometría triangular para proporcionar la mayor cobertura posible. La figura 11 muestra la distribución propuesta.

La Tabla I recoge la localización exacta de todas las estaciones MLAT, ADS-B y SSR que se proponen:

Estructura del sistema MSDF propuesto

Para este sistema propuesto, el proceso de fusión de datos de múltiples sensores (MSDF) recibe a la entrada informes de objetivos de los siguientes sensores: radar (SSR_Gran Piedra), ADS-B (Yunque de Baracoa) y MLAT (Holguín y Santiago de Cuba); y con estos informes recopilados ya es capaz de producir

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
MLAT-Holguín		
VOR/DME	20°47'53"N	076°18'11"O
TWR HLG	20°47'09"N	076°18'33"O
Rx1 HLG	20°46'21"N	076°19'46"O
Rx2 HLG	20°47'36"N	076°18'47.01"O
Rx3 HLG	20°46'45"N	076°19'12.99"O
Rx4 HLG	20°46'54.7"N	076°19'21.39"O
Rx5 HLG	20°47'16.8"N	076°19'03.21"O
Rx6 HLG	20°47'38"N	076°18'08.99"O
WAM1 HLG	20°53'35"N	076°16'57.99"O
WAM2 HLG	20°47'53"N	076°12'25.01"O
WAM3 HLG	20°51'52"N	076°25'52.01"O
WAM4 HLG	20°43'48"N	076°22'27.99"O
MLAT-Santiago		
Rx1 Stgo	19°58'12.4"N	75°48'55.5"O
Rx2 Stgo	19°58'14.5"N	75°49'27"O
Rx3 Stgo	19°58'10"N	75°49'48.3"O
Rx4 Stgo	19°58'09.2"N	75°50'45.5"O
Rx5 Stgo	19°58'12"N	75°51'15.6"O
TWR Stgo	19°58'20.2"N	75°50'24.8"O
WAM1 Stgo	19°58'19"N	75°56'31"O
WAM2 Stgo	19°59'58"N	75°47'54"O
WAM3 Stgo	20°05'0"N	75°51'49"O
ADS-B		
Yunque Baracoa	20°20'43"N	074°34'12"O
SSR_GranPiedra	20°00'33"N	075°37'37"O

Tabla 1. Localización de las estaciones

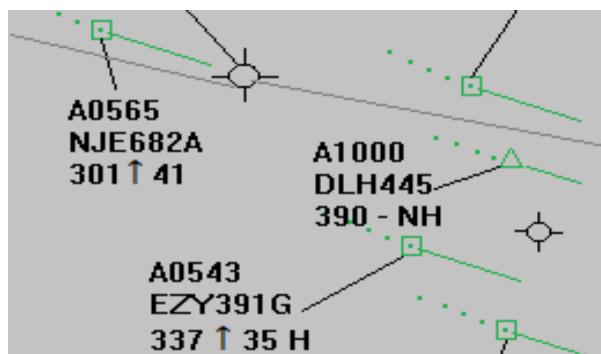


Figura 8. Pistas fusionadas

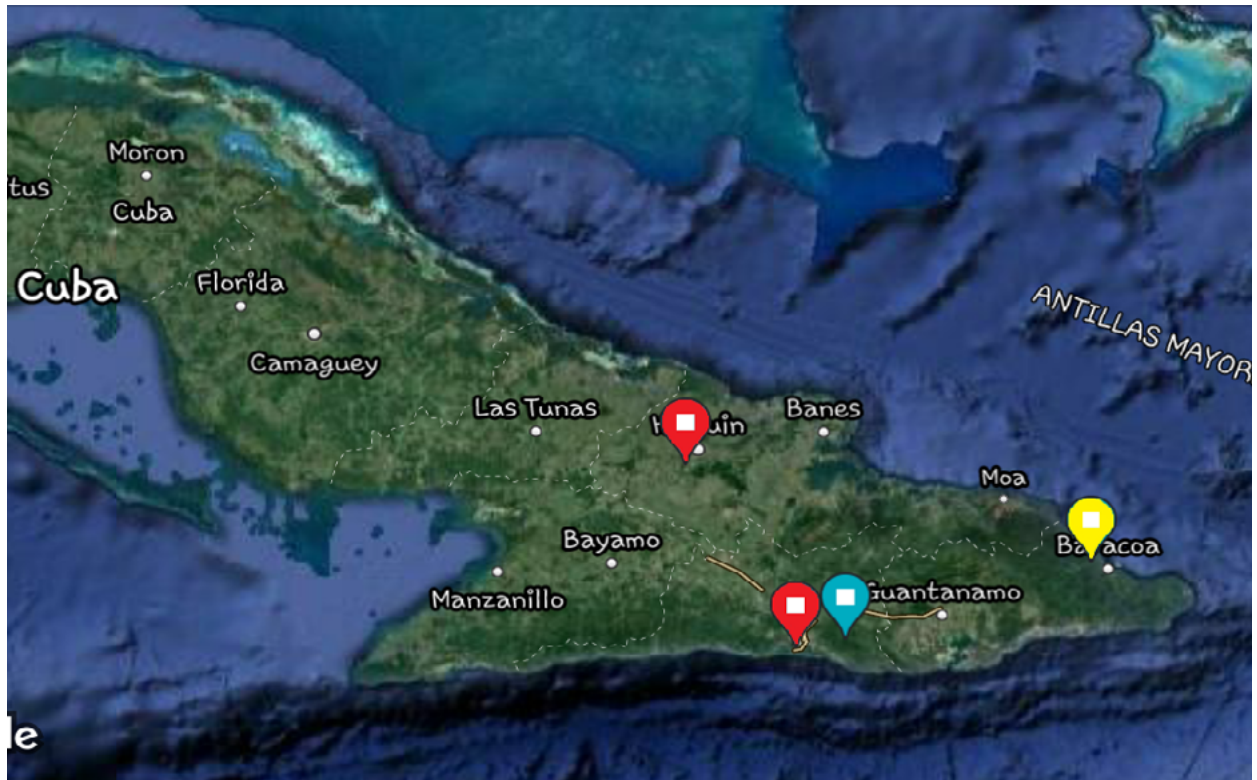


Figura 9. Localización de los sistemas propuestos

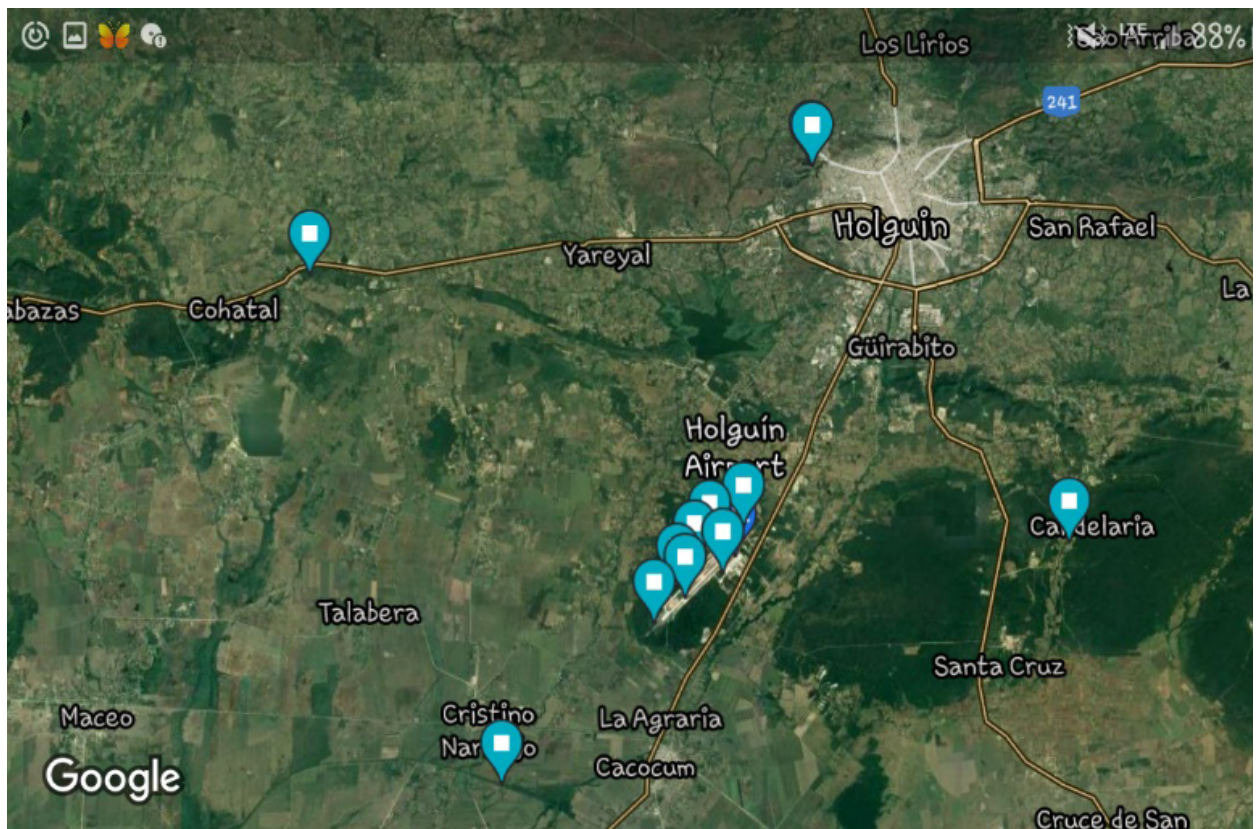


Figura 10. Localización de las estaciones del MLAT-Holguín

pistas del sistema para aplicaciones en el ATC. La Figura 12 muestra el diagrama en bloque correspondiente al diseño propuesto. El mismo incluye los siguientes componentes funcionales: 1) transforma-

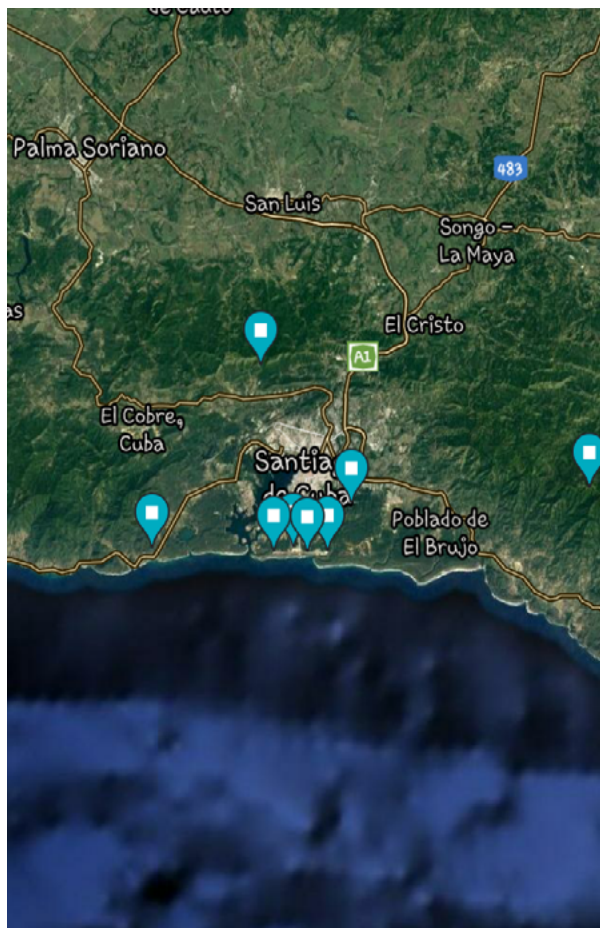


Figura 11. Localización de las estaciones del MLAT-Santiago

ción de coordenadas de las mediciones de los sensores (etapa de preprocesamiento), 2) actualizaciones de la covarianza de las mediciones basadas en coordenadas comunes (etapa de preprocesamiento), 3) asociaciones entre los datos del sensor y sus pistas correspondientes, 4) gestión de pistas, incluida la iniciación, confirmación y eliminación, 5) filtrado y 6) estimación y corrección de sesgos (Jeon *et al.*, 2013).

Resultados y discusión

Las siguientes imágenes (Figuras de la 13 a la 15) son el resultado de simular en el *software* AsTools (desarrollado por especialistas de IACC) el cálculo de la cobertura para los sensores enunciados anteriormente. Además del error horizontal (HDOP) a distintos niveles de altura dentro del área de cobertura de los sistemas MLAT; debido a la importancia que posee el

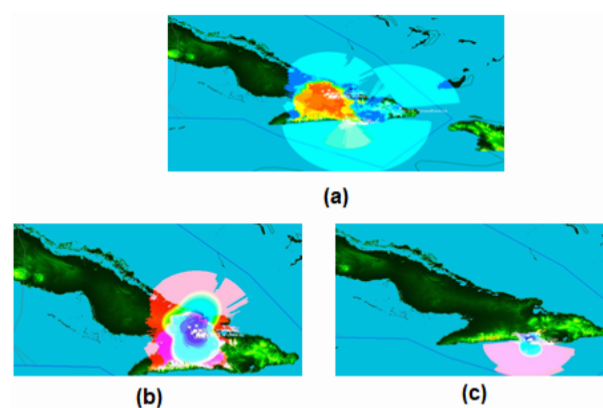


Figura 13. a) Cobertura de los sensores a 1000 pies de altura, b) HDOP MLAT-HLG, c) HDOP MLAT-Santiago

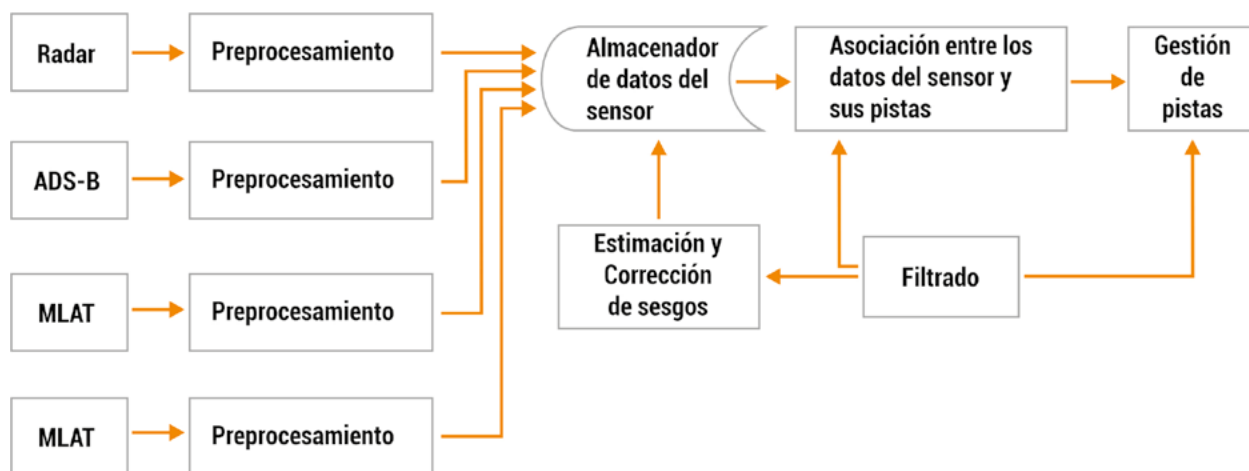


Figura 12. Diagrama en bloque del MSDF propuesto

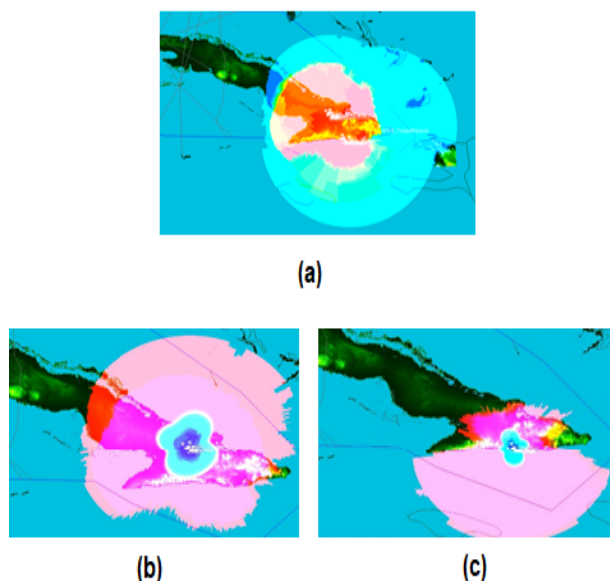


Figura. 14 a) Cobertura de los sensores a 10 000 pies de altura, b) HDOP MLAT-HLG, c) HDOP MLAT-Santiago

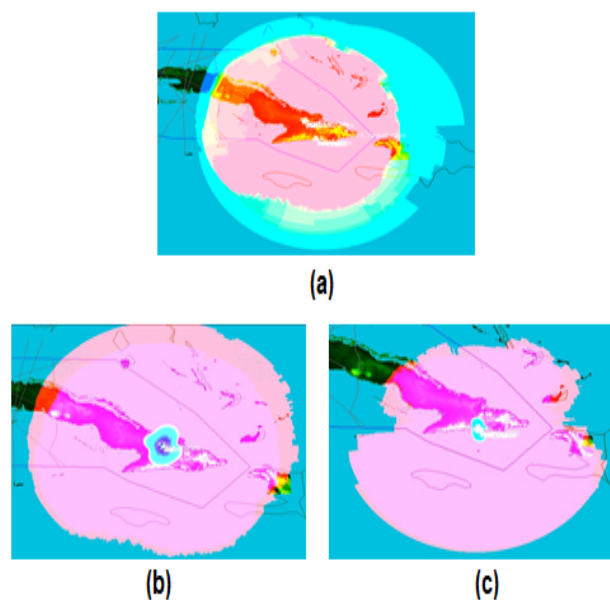


Figura 15. a) Cobertura de los sensores a 50 000 pies de altura, b) HDOP MLAT-HLG, c) HDOP MLAT-Santiago

HDOP en este tipo de sistemas pues está relacionado con la separación horizontal de las aeronaves. Como se observa en las imágenes, el error horizontal es mínimo en las zonas con tonalidad de azul oscuro.

Las figuras anteriores demuestran, que con el sistema propuesto se puede proveer vigilancia a los vuelos que operen en el TMA Santiago; además de obtener mejores indicadores de cobertura, precisión y vigilancia. Las simulaciones realizadas a 1000 pies de altura permiten constatar como el

sistema propuesto brinda cobertura a la zona de los aeropuertos internacionales "Frank País" en Holguín y "Antonio Maceo" en Santiago de Cuba; con buenos niveles de precisión en las proximidades de los aeródromos. En el caso, de las simulaciones para alturas de 10 000 pies en adelante se pudo apreciar la capacidad del sistema para ofrecer vigilancia a los vuelos en ruta.

Comparación del sistema de vigilancia propuesto con el sistema de vigilancia actual

El sistema de vigilancia desplegado actualmente en el TMA Santiago cuenta con dos radares que, tras años de desgaste y explotación, ya no cumplen de manera eficiente su trabajo; presentan dificultades para detectar y vigilar aeronaves a muy bajas alturas; además de ser costoso e insostenible su mantenimiento. A continuación, se establece una comparativa entre el sistema actual (SA) y el sistema propuesto (SP); donde la cobertura ha sido calculada empleando el *Software Radio Mobile*.

Las figuras de la 16 a la 18 demuestran de manera visual la superioridad del sistema propuesto en este trabajo, con el sistema que actualmente se encuentra desplegado en el TMA Santiago. Se pudo comprobar como es posible brindar servicios de vigilancia a aeronaves que sobre vuelen a bajas alturas, con buenos indicadores de cobertura; además de buenos resultados en cuanto a redundancia y precisión: objetivos que son perseguidos en esta zona debido a la tan compleja orografía que presenta.

Haciendo un análisis más profundo de la información que se brindan en las imágenes aportadas por el *Software Radio Mobile*, en cuanto a pixeles, se elaboró la tabla II; la cual ofrece el por ciento

Altura (ft)	Cantidad. de pixeles de la cobertura actual	Cantidad. de pixeles de la cobertura propuesta	% de ganancia del SP vs el SA
1000	2638	4649	43.2566%
5000	3498	5472	36.0745%
10000	4603	7011	34.3460%
20000	6710	9257	27.5143%
30000	8788	11603	24.2610%
50000	12402	14898	16.7540%

Tabla 2. Por ciento de ganancia del SA sobre el SP



(a)

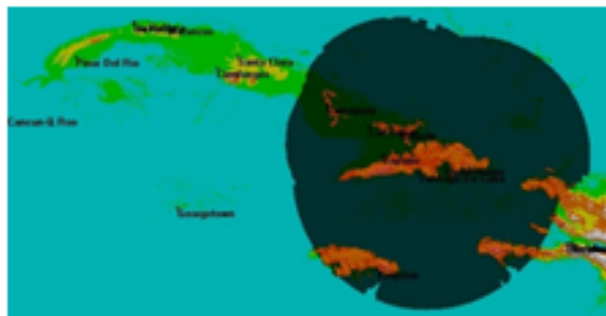


(b)

Figura 16 Cobertura a 1000 pies de altura, a) SA, b) SP

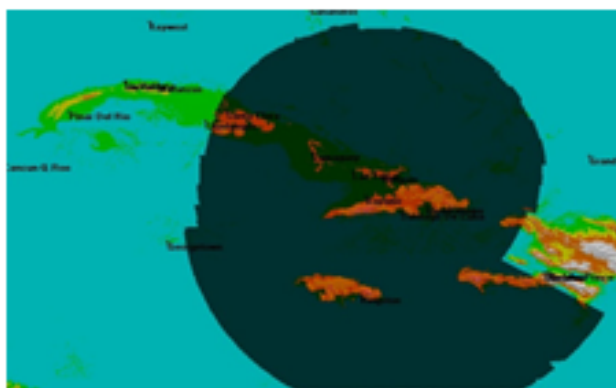


(a)

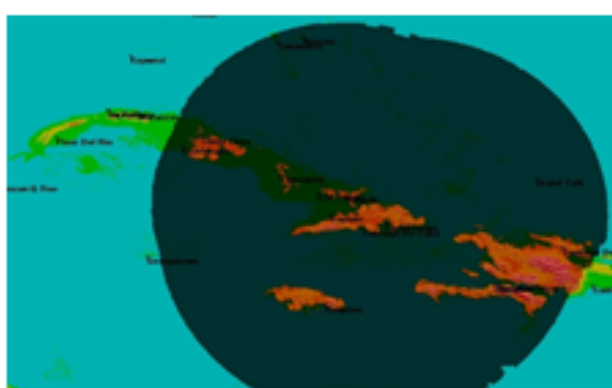


(b)

Figura 17 Cobertura a 10 000 pies de altura, a) SA, b) SP



(a)



(b)

Figura 18 Cobertura a 50 000 pies de altura, a) SA, b) SP

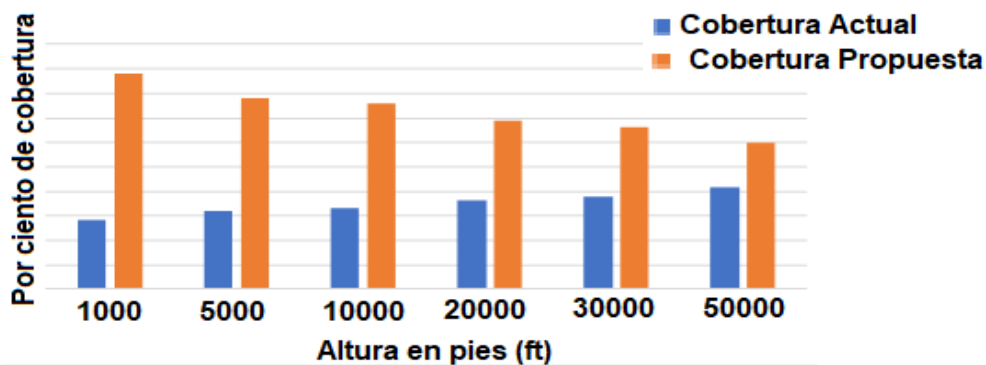


Figura 19. Comparación entre el SA contra el SP

de ganancia que representa la implementación del sistema que se propone frente al sistema actual. La misma se confeccionó con los datos devueltos por la herramienta matemática MatLab utilizando el código desarrollado en (Pérez, 2020).

La figura 19 muestra la comparativa entre el sistema actual y el sistema propuesto según el por ciento de cobertura.

Conclusiones

Con la realización de esta investigación se logró diseñar un sistema de vigilancia aeronáutica basado en el empleo de múltiples sensores, capaz de proveer

mayor seguridad y cobertura a las aeronaves dentro del TMA de Santiago de Cuba; cumpliendo con los requisitos solicitados por la OACI y el país. Se garantizó con el diseño propuesto mejores parámetros en cuanto a precisión, redundancia y exactitud con respecto al que en estos momentos se encuentra desplegado; capaz de brindar cobertura a aeronaves a diferentes niveles de vuelo. Se establecieron las bases generales para la fusión de datos de múltiples sensores de vigilancia, que provienen de los sistemas a ubicar en el TMA Santiago; para de esta forma lograr la visualización de una sola pista fusionada en las pantallas de los controladores de tráfico aéreo.

Referencias bibliográficas

- Espín Villacrés, E. (2008). *Estudio y diseño de un sistema de Multilateración para vigilancia de la zona de Tráfico Aéreo del nuevo aeropuerto de Quito*. [Tesis de Fin de Carrera, Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Eléctrica y Electrónica]. Ecuador.
- Jeon D., Eun Y., Kim H. y Yeom C. (2013). *Multi-sensor data processing for air traffic control system, Korea Aerospace Research Institute*. DOI 10.2316/P.2013.794-013.
- Moreno Quintana, V. (2017). *Desarrollo de un simulador de sistemas de multilateración para vigilancia aérea en TMA*. [Trabajo de Fin de Grado Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España].
- OACI (1999). *Doc 9684-AN/955, Manual of Air Traffic Services Data Link Applications*. Primera Edición.
- Pérez Interian, G. (2020). *Diseño de un sistema de vigilancia para el FIR Habana*. [Tesis de Fin de Carrera, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría]. Ciudad de La Habana, Cuba.
- RTCA (2011). *Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)*. Vol. 260, Part 2 of Document, RTCA (Firm) SC-186.
- THALES (2010). *Integration of surveillance in the ACC automatic system*. ICAO Seminar on the Implementation of Aeronautical Surveillance and Automatic System in the SAM Region San Carlos de Bariloche.
- Vicedo Ramos, A. (2017). Propuesta de diseño de Sistemas de Vigilancia por Multilateración para la Aeronáutica Civil en Cuba. *Revista Telemática*, Vol. 16, (3), 87-98.

