

# Comparación de los sistemas de aterrizaje de precisión ILS y GBAS: Aeropuerto Santiago de Cuba

## Comparison of ILS and GBAS precision landing systems: Santiago de Cuba Airport

Ing. Amaury Silva Correa<sup>1\*</sup>

Dr.C Jorge Esteban Santos Toural<sup>2</sup>

Recibido: 06/2023 | Aceptado: 04/2024 | Publicado: 9/2024

### Resumen

El aeropuerto de Santiago de Cuba posee instalado el Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS, del inglés *Instrument Landing System*) como sistema de ayuda para realizar aterrizajes en condiciones de visibilidad baja o nula. Sin embargo, este cuenta con varios años de explotación por lo que se requiere de su revitalización o sustitución. El objetivo del presente artículo es realizar una comparación entre el sistema ILS existente y un nuevo sistema llamado Sistema de Aumentación Basado en Tierra (GBAS, del inglés *Ground Based Augmentation System*). Este último se encuentra en auge internacionalmente. La comparación entre sistemas se realiza en base a las ventajas y desventajas, requerimientos de infraestructura técnica, las ayudas que brindan desde el punto de vista de navegación, la cobertura aérea, seguridad y una valoración económica. Los resultados obtenidos permitieron determinar que la implementación del sistema GBAS en el aeropuerto de Santiago de Cuba es viable, menos costosa, y que garantiza una mejor gestión del espacio aéreo en las proximidades del aeródromo respecto al sistema ILS existente.

**Palabras clave:** Sistemas de aterrizaje de precisión, GNSS, GBAS, ILS.

1\* Empresa Cubana de Navegación Aérea. Especialista en Sistemas de Radio-navegación y Comunicaciones Aeronáuticas. asilvac1981@gmail.com

2 Departamento de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica. Universidad de Oriente. jsantos@uo.edu.cu

## Abstract

*The Santiago de Cuba airport has installed the Instrument Landing System (ILS) as an aid system to make landings in conditions of low or no visibility. However, it has been in operation for several years. Therefore, it needs to be revitalized or replaced. The aim of this paper is to make a comparison between the existing ILS system and a new system called the Ground Based Augmentation System (GBAS). The latter is internationally successful. The comparison between systems is made based on the advantages and disadvantages, technical infrastructure requirements, the navigations aids, air coverage, safety and an economic assessment. The results obtained allowed us to determine that the implementation of the GBAS system at the Santiago de Cuba airport is viable, less expensive, and that it guarantees better airspace management in the vicinity of the aerodrome compared to the existing ILS system.*

**Keywords:** *precision landing systems, GNSS, GBAS, ILS.*

## Introducción

Las radioayudas para la navegación en el segmento de aproximación final garantizan la seguridad y operatividad de los aeródromos, en condiciones de poca visibilidad y condiciones climatológicas adversas. Tienen su origen en que, bajo las condiciones mencionadas, las luces en las cabeceras y los bordes de pista no garantizan las ayudas necesarias para realizar una aproximación y aterrizaje seguros. Estudios estadísticos aseveran que la mayoría de los accidentes aéreos ocurren durante las fases de aproximación final y aterrizaje (Airbus, 2021; Boeing, 2022). Condicionante esta que contribuye a la necesidad de desarrollar e implementar sistemas de aterrizaje de precisión, que posibiliten incrementar la seguridad de las operaciones aéreas durante estas fases del vuelo.

Los sistemas de aterrizaje de precisión ayudan a la tripulación en la toma de decisiones operacionales y maniobrabilidad de las aeronaves, disminuyendo así el número de accidentes. La primera radioayuda desarrolla para realizar aterrizajes de precisión fue el Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS). Su origen se remonta a trabajos realizados en Europa y Estados Unidos durante las décadas del 20 y el 30 del siglo XX (Čapková, 2009).

Es precisamente un sistema ILS el que se encuentra implementado en el aeropuerto de Santiago de Cuba. Dicho sistema presenta dificultades técnicas entre las que se encuentran:

**Sobrexplotación:** el equipamiento instalado lleva más de 15 años de explotación, por lo que supera los 10 años de explotación recomendados por el fabricante del equipamiento.

**Costes adicionales:** el monitoreo del ILS se encuentra aproximadamente a dos kilómetros de cada subsistema. De esta forma es necesario el despliegue de telefonía, fibra óptica, equipamiento activo, fuentes de poder ininterrumpibles (UPS, del inglés *Uninterruptable Power Supply*), sistema de alarma contra incendio, extintores, grupos electrógenos, entre otros elementos que garanticen el monitoreo constante del correcto funcionamiento de cada subsistema.

**Sensibilidad y deterioro de parámetro:** las señales radiadas por el ILS son afectadas por fenómenos naturales como la humedad provocada por las intensas lluvias, la presencia de vehículos o árboles y arbustos en las zonas críticas. Estas situaciones provocan el deterioro de algunos de sus parámetros, y trae consigo que el sistema entre en alarma e incluso se apague como medida de seguridad.

**Manejo del espacio aéreo:** el aeropuerto de Santiago de Cuba cuenta con dos pistas. Sin embargo, por sus características, el ILS solo brinda ayuda guiada en una pista. Esta característica limita las capacidades de acceso al aeródromo, y del manejo de la capacidad de la rampa. Esto impide realizar varias operaciones en un mismo instante y limita el tráfico cuando por cuestiones de seguridad aeronáutica no se puede utilizar la pista principal.

Las dificultades anteriores llevan a la necesidad de sustituir el equipamiento existente, e incorporar un nuevo sistema ILS para habilitar el tráfico en la segunda pista del aeropuerto. Sin embargo, la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) admite el uso del Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS), que permite la navegación en todas las fases de vuelo y la aproximación de precisión (OACI, 2013). De esta forma la navegación por satélite da lugar al surgimiento del GBAS. El GBAS se despliega en los aeropuertos, como complemento

del GNSS, brindando soporte a las aeronaves en el segmento de aproximación final, durante el aterrizaje.

Diferentes estudios muestran la implementación del GBAS en varias regiones del mundo. Como ejemplos se pueden mencionar los aeropuertos internacionales de Bremen y Frankfurt del Meno en Alemania, el aeropuerto de Málaga-Costa del Sol en España, el aeropuerto internacional de Sydney-Kingsford Smith, en Australia (Jiménez González, 2019). El reciente despliegue de este novedoso sistema, demuestra que es capaz de cumplir con los estándares establecidos por la OACI.

Lo anterior lleva a plantear la posibilidad no de sustituir el equipamiento ILS del aeropuerto de Santiago de Cuba por otro ILS, sino de reemplazarlo por un sistema GBAS. El presente trabajo intenta realizar una comparación entre ambos sistemas, que sirva de base para la toma de decisiones en este sentido.

## **Materiales y métodos**

La comparación entre sistemas se realiza basada en una búsqueda bibliográfica. En esta se tienen en cuenta la revisión documental de los anexos al Convenio sobre Aviación Civil Internacional y la Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra. Se analizan artículos de estudios de caso, fichas técnicas de fabricantes y trabajos académicos. Siempre se tiene en cuenta que la documentación sea aprobada por la OACI, de revistas de revisión por pares, trabajos de universidades de prestigio, y de ser posible, que se encuentren implementados.

A partir de la documentación seleccionada se realiza la comparación entre sistemas teniendo en cuenta:

El análisis de reportes de incidentes y de accidentes de aeronaves. Este análisis sirve de indicador sobre la seguridad y fiabilidad del sistema de ayuda al aterrizaje.

Capacidad de manejo de aeronaves. Este análisis permite conocer cuál sistema es más eficiente ante una posible congestión de tráfico.

Área de cobertura y capacidad de guiado de aeronaves durante la aproximación. Brinda información sobre la distancia, altitud, y rumbo

respecto a la pista desde el cual el piloto puede auxiliarse del sistema de ayuda al aterrizaje.

Coste de implementación. Permite realizar un análisis económico de la implementación de ambos sistemas de ayuda.

A partir de la información recopilada, se procede a tomar una decisión sobre la ventaja de implementar un sistema u otro en el aeródromo de la ciudad de Santiago de Cuba. Para ello se tienen en cuenta las características del aeropuerto de la ciudad de Santiago de Cuba.

## **Breve descripción del sistema ILS**

El ILS brinda servicio en la pista principal de los aeropuertos. Este se encarga de suministrar a la tripulación la información necesaria para realizar las maniobras de aproximación y aterrizaje, hasta un punto donde existan suficientes referencias para poder continuar la aproximación a la pista de forma visual. El mismo consta de dos subsistemas (ANAC, 2012; Čapková, 2009; Jiménez González, 2019):

El Localizador: ofrece guía horizontal, indicando a la tripulación de las aeronaves la ubicación del centro de la pista.

La Glisada: ofrece guía vertical, indicando a la tripulación la senda de planeo o ángulo de descenso.

El Localizador opera en la banda VHF, mientras que la Glisada opera en la banda UHF y ambos requieren de la implementación de un campo de antenas para transmitir sus señales. El receptor a bordo de las aeronaves, procesa las señales radiadas por el localizador y la glisada, mostrando a la tripulación la ubicación correcta de la aeronave y activando las alarmas pertinentes en caso de desviación, facilitando el proceso de aterrizaje (Holm, 2017).

El ILS dispone de tres balizas: la externa (OM del inglés Outer Marker), la intermedia (MM del inglés Medium Marker), y la interna (IM del inglés Inner Marker). Su disposición se ilustra en la figura 1. La primera se encuentra a 250 pies del centro de la línea y entre 3,5-6,0 millas náuticas del umbral de la pista, la segunda se encuentra entre 0,5-0,8 millas náuticas del umbral de la pista, mientras que la última se encuentra entre el umbral de la pista y la baliza intermedia (Aishwarya, 2022). Operan a una frecuencia de 75 MHz. Las balizas pueden ser

sustituidas por un Equipo de Medición de Distancias (DME del inglés Distance Measuring Equipment). Consiste en una tercera antena cuya emisión debe detectarse por lo menos a 25 millas náuticas de la pista y en un cono de  $\pm 10^\circ$ . En la Tabla 1 se observan los tipos de aterrizajes de precisión que se pueden realizar mediante el sistema ILS.

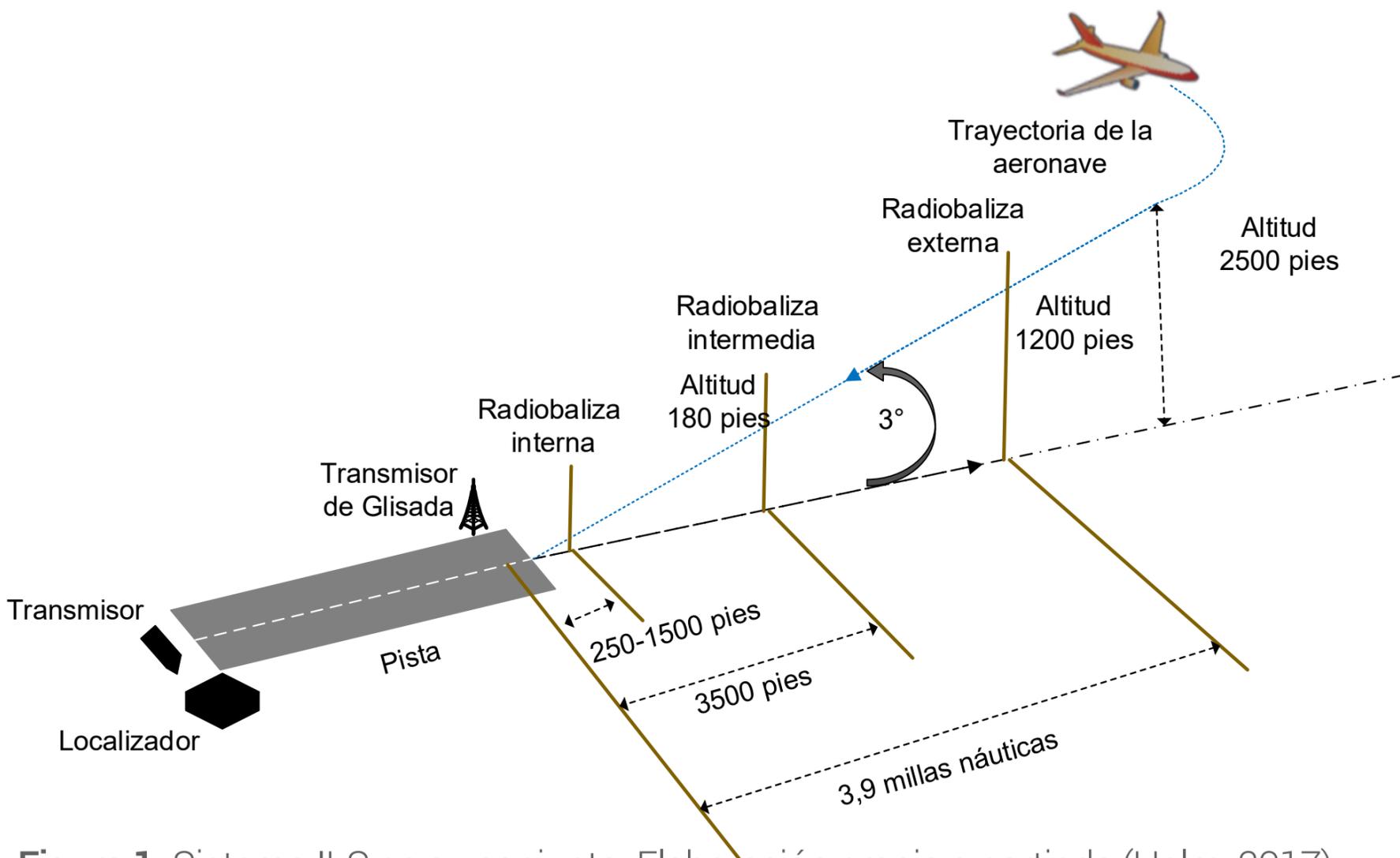


Figura 1. Sistema ILS en su conjunto. Elaboración propia a partir de (Holm, 2017)

Categoría	Altura de decisión (pies)	Rango de visibilidad de la pista (metros)
I	200	> 550
II	100 - 200	> 300
IIIA	0 - 100	> 175
IIIB	0 - 50	50 - 175
IIIC	0	0

Tabla 1. Categoría de los sistemas de aterrizajes de precisión. (Aishwarya, 2022)  
 Para más detalles ver (Aishwarya, 2022; OACI, 2006; Stołny, 2016)

## Breve descripción del sistema GBAS

El Sistema de Aterrizaje GBAS intensifica las señales de los sistemas GNSS para permitir su uso en el aterrizaje guiado de aeronaves. Las señales de GNSS presentan un bajo nivel de potencia, además se ven afectadas por distorsiones atmosféricas y el efecto multitrayectorias. El GBAS se encarga de la transmisión de correcciones, parámetros de

integridad y coordenadas de referencia en la aproximación. Su principio de funcionamiento se observa en la figura 2 (Felux, 2018; Jiménez González, 2019; OACI, 2013).

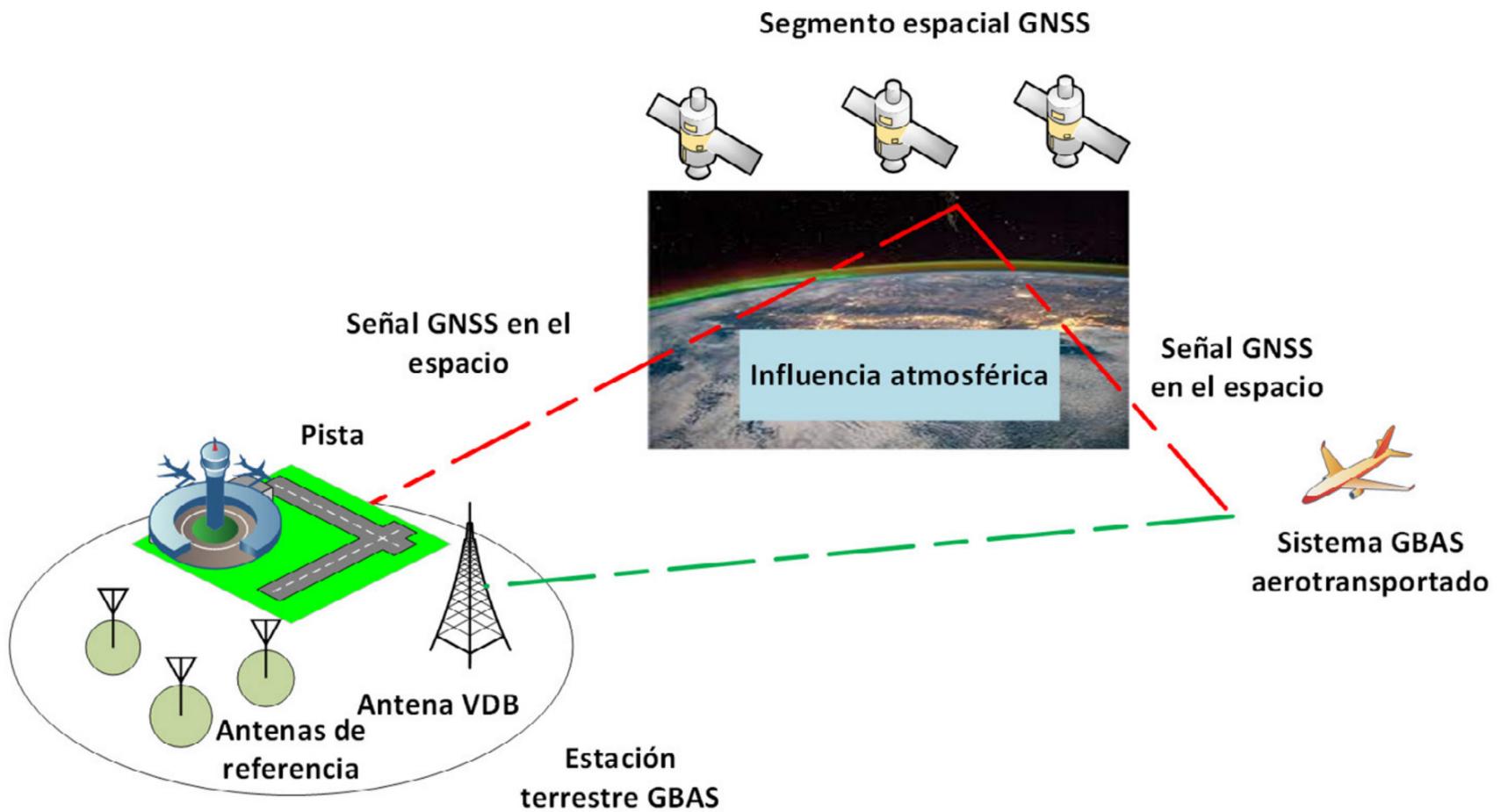


Figura 2. Estructura del sistema de aterrizaje GBAS. Basado en (Felux, 2018)

El sistema está compuesto por tres subsistemas (Felux, 2018; Jiménez González, 2019; OACI, 2013):

1. Las constelaciones de satélites del sistema GNSS. Se trata de las constelaciones de satélites GPS, GLONASS, GALILEO o Beidou.
2. La estación terrestre GBAS. Este es el centro neurálgico de todo el sistema. Su interrelación se ilustra en la ver figura 3, donde la saeta indica la dirección del flujo de información. Sus partes componentes son:

Cuatro antenas receptoras de referencia (RRA del inglés, *Reference Receiver Antenna*). Estas se colocan en sitios con un levantamiento geográfico muy preciso (OACI, 2006; Poulouse, Mahapatra, & Balakrishnan, 1985).

Una antena de radiodifusión de datos en VHF (VDB del inglés, *VHF Data Broadcast*). Antena omnidireccional encargada de transmitir los datos desde la estación terrestre en todas las direcciones dentro del volumen de cobertura (OACI, 2013).

Una estación base de procesamiento (PBS del inglés, *Processing Base Station*).

Una estación de monitoreo de integridad (IMS del inglés, *Integrity*

*Monitoring Station*). Ambas estaciones deben garantizar las correcciones de posición y hora de referencia, monitorización e información de la integridad, y proporcionar datos de la aproximación final (Felux, 2018).

3. Receptor de la aeronave: requiere de una antena receptora de GNSS, una antena receptora para los datos de la estación terrestre y un sistema de recepción y procesamiento.

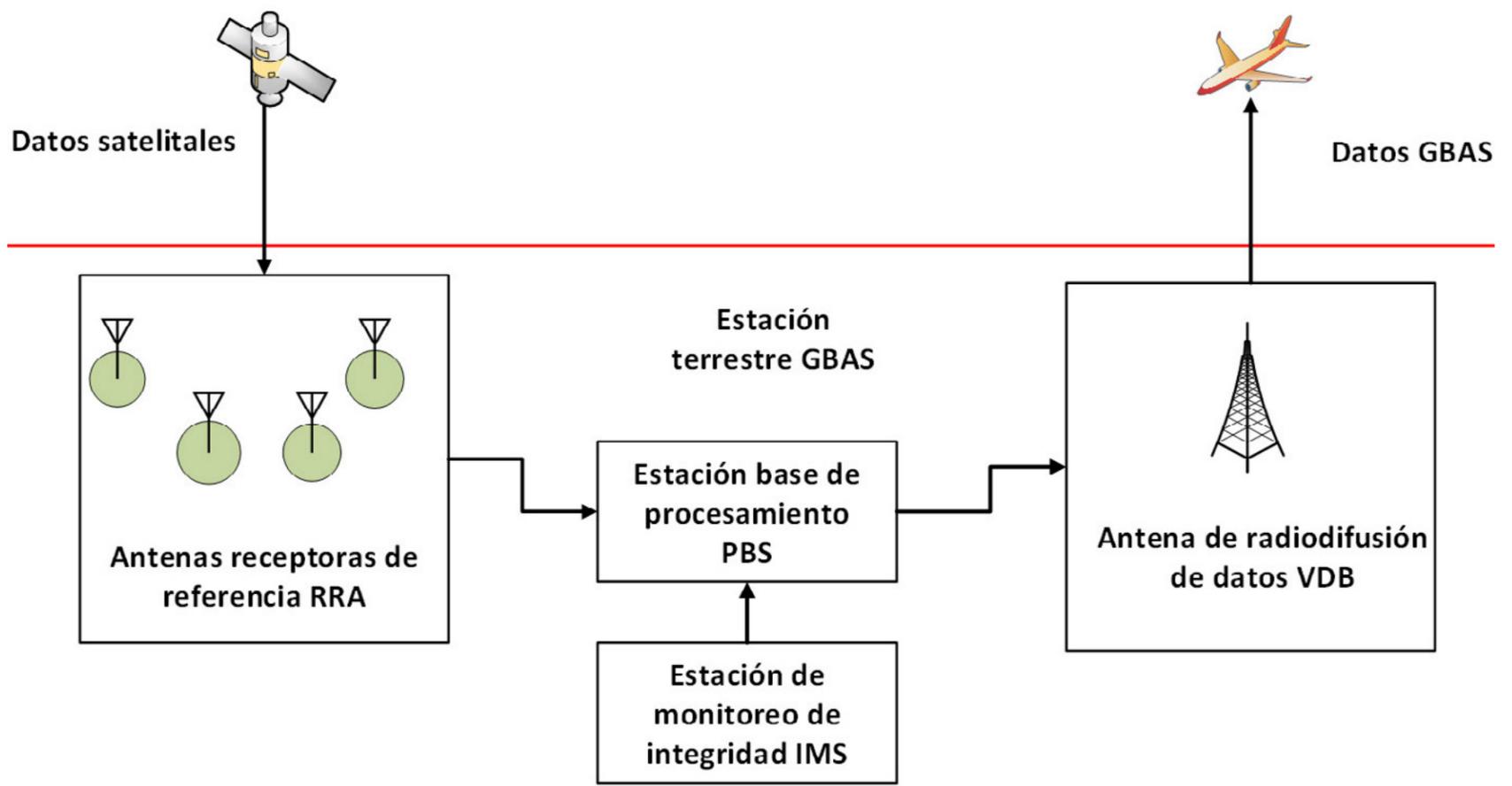


Figura 3. Subsistema de tierra.

Los sistemas GBAS actuales brindan servicio de aproximación tipo C (GAST-C, del inglés GBAS Approach Service Type - C) con una precisión para el aterrizaje de categoría I, no obstante, estos se encuentran en evolución a GAST-D, lo que permitirá realizar aterrizajes de precisión categoría III. (Mäurer, et al.,2021)

Investigaciones de la Administración Federal de Aviación (FAA, del inglés Federal Aviation Administration) propiciaron la definición de los estándares para GAST-D, los cuales entraron en vigencia en 2018 y representan las bases para los desarrolladores de esta tecnología, que requieran la aprobación de diseño del sistema de la FAA para un GBAS GAST-D. (FAA, 2023)

El servicio de aproximación tipo F (GAST-F) posibilitará al GBAS operar con dos constelaciones satelitales, brindando robustez al sistema, de ahí que se encuentren en desarrollo múltiples investigaciones, relacionadas al correcto funcionamiento de estas constelaciones ante

diferentes aspectos que afectan al sistema GBAS, como la demora debido a la influencia de la ionosfera y la troposfera, ataques radio eléctricos, la interferencia debido a la multitrayectoria y otros aspectos. (Alhosban, 2022; Yanbo, Z., Yuan L., Zhipeng W., & Qiang L., 2019; Alhosban, 2019)

Para más detalles ver (FAA, 2010; Jiménez González, 2019; OACI, 2013)

## Caracterización del aeropuerto

El aeropuerto internacional Antonio Maceo de Santiago de Cuba se ubica en la región sur - oriental del país. Diariamente recibe vuelos internacionales y funciona como alerno del aeropuerto internacional de Holguín. En él se brindan servicios de tránsito aéreo y servicios de información aeronáutica y meteorológica (AIS/MET por sus siglas en inglés) las 24 horas. Durante la pandemia del COVID-19, el volumen de operaciones se redujo a casi 0. Sin embargo, desde finales del 2021 y comienzos del 2022 se ha ido recuperando el nivel operacional del aeródromo.

En su infraestructura cuenta con dos pistas, además de radioayudas para la navegación aérea, ILS, transmisómetro y celiómetro, ver figura 4. Independientemente a los sistemas instalados en el mismo, debido a la ubicación del Localizador, uno de los subsistemas del ILS, el sistema de aterrizaje solo garantiza operaciones de precisión categoría I. Actualmente se utilizan solamente la pista que contiene a las cabeceras 10 y 28. De estas solamente la cabecera 10 soporta aterrizaje visual y asistido por ILS.



Figura 4. Imagen aérea del aeródromo de Santiago de Cuba (Google Map).

## Resultados y discusión

### Reportes de incidentes y accidentes

Los sistemas de aterrizaje de precisión ILS y GBAS son constantemente actualizados y calibrados anualmente por empresas certificadas para ello. A pesar de esto, pueden ocurrir fallas que causen accidentes. Cabe destacar que la influencia del factor humano, también puede provocar accidentes. La revisión de datos muestra que ocurre un mayor número de incidentes debido al factor humano realizando operaciones ILS que durante operaciones GBAS.

Vuelo 6448 de la aerolínea *Delta Connection*. Al aterrizar en el aeropuerto internacional Cleveland-Hopkins, se salió de la pista, hizo contacto con una de las antenas del localizador y golpeó la valla perimetral del aeropuerto. El aeródromo se encontraba en condiciones de poca visibilidad debido a la nieve intensa. Además, el sistema ILS tenía fuera de servicios la glisada. No obstante, la tripulación decidió realizar el aterrizaje guiándose por el localizador (National Transportation Safety Board, 2008).

Incidente relacionado con los instrumentos de aterrizaje, en septiembre de 2018. Vuelo de Air India AI 101 (desde Nueva Delhi a Nueva York). Los tres receptores de la señal del ILS de la aeronave (Boeing 777-300) sufrieron fallas en su funcionamiento, así como dos altímetros. Las fallas causaron que el piloto debiera aterrizar la aeronave en un aeropuerto alternativo a su destino, con mejores condiciones de visibilidad. (Times, 2018)

Vuelo OZ-952 de la aerolínea Asiana (1/4/2020 desde Hanoi a Hong Kong) realizó una aproximación ILS a la pista 07R de Hong Kong. La aeronave descendió a los 800 pies a unas 4,6 millas náuticas antes del umbral de la pista. En este momento la tripulación recibió una advertencia por parte del control de tránsito aéreo, que debían estar al tanto de posibles fluctuaciones de la senda de planeo debido a la presencia de una aeronave en el área sensible. Un incidente similar ocurrió durante el vuelo 314 de Air India el 20/10/2018, la aeronave descendió a 200 pies, encontrándose a 2,6 NM del umbral de la pista 07R. (Amit, 2020)

Un informe del Sistema de informes de seguridad aeronáutica (ASRS, del inglés *Aviation Safety Reporting System*) de la NASA describe una aproximación frustrada repentina en el aeropuerto internacional de Newark. La tripulación dio testimonio de que el descenso transcurría sin contratiempos con una buena señal del ILS. Dicha señal se volvió inestable, poco confiable e ilegible. Al contactar con la torre de control, el controlador de tránsito aéreo les confirmó la situación y pocos minutos después la tripulación se vio forzada a enviar un reporte de altitud baja y realizar una aproximación frustrada. (NASA, 2023)

Luego de analizar esos y otros incidentes, se puede afirmar que la mayoría de los incidentes reportados ocurrieron durante aproximaciones ILS. Las causas radican tanto en fallas del sistema de a bordo de las aeronaves como de la calidad e integridad de la señal radiada por el sistema. Las decisiones tomadas por las tripulaciones, también tienen un alto grado de responsabilidad en estos incidentes, fundamentalmente durante operaciones de aproximación bajo los mínimos. No se reportan incidentes debido a fallas del GBAS, en 14 años de explotación del sistema en diferentes aeropuertos del mundo. Lo anterior da indicios de que este sistema es una mejor opción en términos de seguridad, proyectándolo como el futuro de los sistemas de aterrizajes de precisión (Džunda, Dzurovčín, & Ondruš, 2019; Felux, Dautermann, & Becker, 2013; Jeong, Bae, Jun, & Lee, 2016; Salabert, Hendriks, Rawlings, & Farnworth, 2008).

## **Capacidad de manejo de aeronaves**

El ILS brinda las ayudas necesarias para realizar aterrizajes de precisión. Además, permite la operación de las aeronaves en condiciones de ausencias de visibilidad. A pesar de sus actualizaciones tecnológicas, el ILS presenta ciertas dificultades (Felux et al., 2013; Jeong et al., 2016):

Es susceptible a las interferencias de haces eléctricos.

Se ha detectado presencia ocasional de falsos ejes por reflejo del haz sobre un relieve.

Brinda servicios a una pista.

Permite un solo usuario por aproximación.

Presenta zonas críticas.

El GBAS tiene por objeto dar apoyo a todos los tipos de aproximación, aterrizaje, salida y operaciones en tierra. Además, puede apoyar operaciones en ruta y terminales. Presenta como beneficios sobre el ILS (Guenter & Dennis, 2015; Murphy & Imrich, 2008; OACI, 2013; Salabert et al., 2008):

Permite realizar aproximaciones en curva.

Reduce las zonas críticas y sensibles.

Ofrece servicio de determinación de la posición.

Suministra varios ángulos de planeo de aproximación.

Opera con umbral desplazado.

Proporciona correcciones de pseudodistancia.

Brinda servicio a varias pistas.

Todas estas ventajas le permiten garantizar una mejor gestión del espacio aéreo, dado que reduce el tiempo de ocupación de pista incrementando el rendimiento de la misma y reduce la distancia de separación entre aterrizajes en condiciones de baja visibilidad. Además, permite el aterrizaje guiado en todas las pistas del aeródromo. Lo anterior agiliza el proceso de aterrizaje de aeronaves procedentes de diferentes orígenes y reduce al mínimo el número de aeronaves en espera por condiciones climatológicas adversas en las cabeceras de la pista. (Džunda et al., 2019; Felux, 2018; Felux et al., 2013; Guenter & Dennis, 2015).

Área de cobertura y capacidad de guiado de aeronaves durante la aproximación

El ILS brinda ayuda guiada en una sola de las pistas, en un ángulo reducido con un margen de error respecto al centro de la pista de  $\pm 2^\circ$ . Además, ofrece una senda de planeo de  $3^\circ$  con un margen de error de  $\pm 0,7^\circ$ . Las aeronaves son capaces de interceptar su señal sobre los 5000 pies y las 25 millas náuticas de distancia hasta el umbral de la pista. Estas características traen como consecuencia que las aeronaves deban volar hasta determinados puntos donde sean capaces de detectar la señal del ILS. Por otra parte, requiere que el descenso sea de forma escalonada (Chittaro & Burigat, 2004; Holm, 2017).

El GBAS en cambio, dispone de una antena omnidireccional, lo que permite tener una cobertura de 360 grados alrededor del aeródromo.

Su volumen de cobertura mínimo es de 10000 pies y 23 millas náuticas. El GBAS dispone de varios ángulos de descenso, lo que facilita el proceso de aterrizaje de manera directa y no escalonada. Dentro del volumen de cobertura las aeronaves reciben los datos necesarios para realizar las maniobras de aproximación final a la pista, hasta el aterrizaje. Permite realizar aproximaciones en curva con sendas de planeo superiores a los 3 grados. De igual forma es posible realizar aproximaciones frustradas de manera guiada. (Mäurer et al., 2021; Murphy & Imrich, 2008)

## Coste de implementación

Un análisis comparativo del costo de implementación de los sistemas ILS y GBAS, se muestra en la Tabla 2. Es posible determinar que la adquisición del sistema ILS, es más costosa que la de un sistema GBAS.

Esferas de inversión	Costo de Instalación ILS Categoría I (€)	Costo de Instalación GBAS Categoría I (€)
Infraestructura	336 000	500 000
Instalación y puesta en marcha	175 000	120 000
Obra civil	195 000	44 000
Calibración	30 000	30 000
Costos operacionales anuales	79 000	43 000
<b>Costo total</b>	<b>815 000</b>	<b>737 000</b>

**Tabla 2.** Costos asociados a los sistemas ILS y GBAS (Esteves, 2007) (Džunda et al., 2019).

De las cinco esferas de inversión, solamente la infraestructura del GBAS supera el costo de la del ILS. La causa se encuentra en lo novedoso del sistema, así como alcance y capacidades de servicio superiores. En el resto de los elementos de inversión, se observa que los costos del ILS superan los del GBAS. Es en los costos operacionales donde GBAS presenta la mayor ventaja. Permite un ahorro de €36 000 anuales con respecto al ILS. Considerando que, por recomendaciones de fabricantes, estos sistemas deben ser renovados como mínimo cada

10 años el ahorro representa €360 000 (Džunda et al., 2019; Salabert et al., 2008). En términos económicos es más factible adquirir un GBAS que un ILS.

## Discusión

El análisis realizado permite observar que el sistema GBAS se perfila como un fuerte competidor del sistema ILS. Desde el punto de vista de seguridad se aprecia que no se reportan accidentes o incidentes donde el sistema GBAS se ve involucrado. Aunque este dato debe ser visto con cautela pues el sistema ILS se encuentra mayormente extendido, y muchos incidentes se deben a factores humanos. De todas formas, el simple hecho de que GBAS no presenta áreas críticas que puedan interferir con la señal ya representa una ventaja de seguridad.

Desde el punto de vista de la capacidad de manejo de aeronaves, sus ventajas resultan evidentes. La posibilidad de presentar cobertura de 360º permite una mejor administración del espacio aéreo pues las aeronaves pueden comenzar a tener datos de aproximación sin necesidad de estar alineadas con la pista. También se puede agilizar el movimiento de aeronaves en tierra pues este no crearía obstrucción de zonas críticas, lo que ocurre en el sistema ILS. Por otra parte, un solo sistema puede brindar servicio a varias pistas.

Desde una perspectiva económica, para aeropuertos de varias pistas se requiere de implementar el sistema ILS para cada pista. Esto no es necesario con el GBAS ya que es omnidireccional. Esto disminución de equipamiento se traduce en una disminución significativa de la inversión. Por otra parte, los gastos de mantenimiento lo hacen rentable en plazos de 10 años.

Desde un punto de actualidad tecnológica, tanto la FAA como las entidades de control aéreo europeas plantean la implementación generalizada del sistema GBAS en los próximos años. Los fabricantes de aeronaves Boeing y Airbus ya lo traen integrados dentro de su aviónica.

Desde la perspectiva del aeropuerto de Santiago de Cuba se observa que el GBAS, es el sustituto ideal del ILS, dado que permitirá disponer de radioayudas para el aterrizaje en sus múltiples pistas. Se dispondrán de varios ángulos de descenso y aproximación en curva lo que favorece en

mayor medida las operaciones aéreas de las aeronaves provenientes del norte y el occidente del país que realizan la aproximación final, una vez sobrepasan la cadena montañosa Sierra Maestra. Se podrán realizar operaciones aéreas guiadas en las cabezas de pista 19 y 01. Disminuirán las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la reducción del tiempo de las maniobras de aterrizaje. Facilitará una mejor gestión del espacio aéreo durante las operaciones aéreas que generan tráfico por su coincidencia en el tiempo. Se instalará un sistema moderno con disímiles prestaciones, en sustitución de uno con más de 15 años de explotación.

## Conclusiones

El presente trabajo es el primero de su tipo en Cuba, que se tiene conocimiento, orientado a una comparación entre los sistemas ILS y GBAS con vistas a decidir por la implementación de uno u otro en un aeropuerto cubano. Se observa que la no implementación del sistema GBAS en el entorno cubano puede llevar desactualización tecnológica que puede ser difícil de reducir posteriormente. La afirmación anterior se fundamenta en los esfuerzos para impulsar su uso de las oficinas rectoras de la aeronáutica civil en Estados Unidos y Europa, y los dos grandes fabricantes de aviones Boeing y Airbus.

El sistema GBAS muestra ser superior en los aspectos de seguridad, capacidad de manejo de aeronaves e inversión económica. No se reportan incidentes, puede manejar aproximaciones desde cualquier ángulo y por cualquier cabecera de pista, y elimina buena parte del control de movimiento en tierra al no poseer áreas críticas. Su menor costo de explotación representa una notable ventaja en ahorro monetario respecto al ILS.

Por último y cumpliendo el objetivo principal del trabajo, se observa que la implementación del sistema GBAS en el aeropuerto de Santiago de Cuba es preferible a una actualización del sistema ILS. Esta afirmación se basa sobre todos en aspectos económicos de ahorro en términos de 10 años, y a la posibilidad de que un solo sistema permita extender los aterrizajes atendidos a las dos pistas del aeropuerto. Si se tiene en cuenta que para lograr lo mismo con el sistema ILS se requiere de dos sistemas las ventajas económicas se hacen evidentes.

## Referencias bibliográficas

- Airbus, S. (2021). A statistical analysis of commercial aviation accidents 1958-2020. *Tech. Rep.*
- Aishwarya, C. (2022). The Instrument Landing System (ILS)—A Review. *Int. J. Progress. Res. Sci. Eng*, 3, 1-6.
- Alhosban, A. (2022). Impact of GPS Navigational Errors on the Required Performance of GBAS Approach Service Type D/F (GAST-D/F), 2022
- Alhosban, A. (2019). Electronic warfare in NAVWAR: Impact of electronic attacks on GNSS / GBAS approach service types C and D landing systems and their proposed electronic protection measures (EPM) *Hadmérnök*, 14(2), 238-255.
- Amit, S. (2020). Asiana incident at HKG after AI-314 raises concern about ILS signal protection. Retrieved from <https://safetymatters.co.in/2020/04/15/asiana-incident-at-hkg-after-ai-314-raises-concern-about-ils-signal-protection/?amp>
- ANAC, A. N. d. A. C. A. (2012). *Manual de Radioayudas a la Navegacion Aérea*. ANAC, Administración Nacional de Aviación Civil Argentina.
- Boeing, C. A. (2022). Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959–2021.
- Čapková, M. (2009). ILS—Instrument Landing System Ground-Based Instrument Approach System. *Perner's Contacts*, 4(4), 39-44.
- Chittaro, L., & Burigat, S. (2004). *3D location-pointing as a navigation aid in Virtual Environments*. Paper presented at the Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces.
- Costa Silva, W., Galera Monico, J. F. (2022) GBAS: fundamentals and availability analysis according to . *Journal of Geodetic Science* 12(1) (2022): 22-37.
- Džunda, M., Dzurovčin, P., & Ondruš, M. (2019). *Economic analysis of the operation of the navigation infrastructure of MR Stefanik Airport*. Paper presented at the 2019 New Trends in Aviation Development (NTAD).
- Esteves, P. A. F. (2007). Operational Evaluation of a GBAS System. *Aerosp. Eng*, 96.
- FAA, F. (2010). *Siting Criteria for Ground Based Augmentation System (GBAS)*. (6884.1). USA: FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION.
- FAA, F. (2023). Satellite Navigation - GBAS - How It Works. Disponible en: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks)

- Felux, M. (2018). *Total system performance of GBAS-based automatic landings*. Doctoral dissertation, Technische Universität München.
- Felux, M., Dautermann, T., & Becker, H. (2013). GBAS landing system–precision approach guidance after ILS. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.
- Guenter, D., & Dennis, J. (2015). *Initial operational experience with CAT I ground based augmentation system (GBAS)*. Paper presented at the 2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS).
- Holm, M. R. (2017). *ILS Fundamentals: The Instrument Landing System in theory*: Createspace Independent Publishing Platform.
- Jeong, M.-S., Bae, J., Jun, H.-S., & Lee, Y. J. (2016). Flight test evaluation of ILS and GBAS performance at Gimpo International Airport. *GPS solutions*, 20, 473-483.
- Jiménez González, Á. (2019). Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria. Tesis de Maestría.
- Mäurer, N., Gräupl, T., Bellido-Manganell, M. A., Mielke, D. M., Filip-Dhaubhadel, A., Heirich, O., Becker, D. (2021). Flight trial demonstration of secure GBAS via the I-band digital aeronautical communications system (LDACS). *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(4), 8-17.
- Murphy, T., & Imrich, T. (2008). Implementation and operational use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs)—A component of the future air traffic management system. *Proceedings of the IEEE*, 96(12), 1936-1957.
- NASA. (2023). Unreliable ILS Signal Causes A Missed Approach. Retrieved from <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/safety/unreliable-ils-signal-causes-missed-approach-on-final-segment-course-scalloping/>
- National Transportation Safety Board, N. (2008). *Runway overrun during landing Shuttle America, Inc. Doing business as Delta Connection flight 6448 Embraer ERJ – 170, N862RW Cleveland, Ohio* NTSB.
- Anexo 10 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, Telecomunicaciones aeronáuticas, Volumen I: Radioayudas para la navegación, (2006).
- Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra, (2013).
- Poulose, M., Mahapatra, P., & Balakrishnan, N. (1985). Microwave Landing System—A Favoured Alternative to Current ILS. *IETE Technical Review*, 2(11), 375-382.
- Salabert, F., Hendriks, A., Rawlings, R., & Farnworth, R. (2008). *EUROCONTROL Policy on GNSS*. Paper presented at the Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION

GNSS 2008).

Stołtny, M. (2016). Instrument landing system as an example of a precision approach system. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*(93), 123--129.

Yanbo, Z., Yuan L., Zhipeng W., Qiang L. (2019). Evaluation of GBAS flight trials based on BDS and GPS

