



ORGANIZACION DE AVIACION CIVIL INTERNACIONAL

GUIA PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS DE AUMENTACION BASADOS EN TIERRA

Mayo 2013

Prefacio

Varios países están desarrollando e implementando el Sistema de Aumentación Basado en Tierra (GBAS) y se está generando gran cantidad de información. El propósito de esta guía es que sirva de base para los países interesados en implementar el GBAS.

Tomando en cuenta el constante desarrollo del GBAS, este manual debería ser considerado como un documento vivo que debería ser actualizado en forma constante.

Se agradecerá sus comentarios dirigidos a icaosam@icao.int.

INDICE

1	Introducción	4
2	El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS).....	6
2.1	Principales constelaciones de satélites	6
2.1.1	Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS)	6
2.1.2	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)	7
2.2	Receptores del GNSS	9
2.3	Sistemas de aumentación	9
2.3.1	Sistema de aumentación basado en la aeronave (ABAS)	9
2.3.2	Sistema regional de aumentación basado en tierra (GRAS).....	10
2.3.3	Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS)	11
3	Sistema de aumentación basado en tierra (GBAS).....	12
3.1	Descripción general.....	12
3.2	Beneficios del GBAS	13
3.2.1	Reducción de las zonas críticas y sensibles	14
3.2.2	Aproximación en curva.....	14
3.2.3	Servicio de determinación de la posición	14
3.2.4	Suministro del servicio en varias pistas del mismo aeropuerto	15
3.2.5	Suministro de varios ángulos de planeo de aproximación y umbral desplazado.....	15
3.2.6	Aproximación frustrada con guía.....	15
3.2.7	Uso en aeropuertos adyacentes	15
3.3	Información técnica básica del GBAS	15
3.3.1	Contenido de los datos	17
3.3.1.1	Mensaje de tipo 1.....	17
3.3.1.2	Mensaje de tipo 2.....	18
3.3.1.3	Mensaje de tipo 4.....	18
3.3.2	Número de canal	19
3.3.3	Receptor GBAS	19
3.3.4	Consideraciones en cuanto al emplazamiento	20
3.3.5	Problemas de interferencia en las frecuencias	21
3.3.6	Influencia de la ionósfera.....	22
3.4	Desarrollo del GBAS	24
3.4.1	Grupo de Trabajo Internacional del GBAS (IGWG).....	24
3.4.2	Fabricantes de estaciones GBAS	24
3.4.3	Fabricantes de receptores GBAS	25
3.4.4	El GBAS en los fabricantes de aeronaves.....	25
3.5	Consideraciones para la implementación del GBAS	25
3.5.1	Planificación de la implementación	25
3.5.2	Análisis del impacto de la ionósfera sobre el GBAS.....	26
3.5.3	Instrucción del personal	27
3.5.4	Adquisición e instalación de la estación terrestre GBAS	28
3.5.5	Certificación y aprobaciones operacionales.....	28
4	Lista de siglas.....	30
5	Lista de referencias en el documento.....	32
6	Lista de documentos de referencia.....	33

Guía para la Implementación de Sistemas de Aumentación Basados en Tierra

1 Introducción

Todas las ayudas para la navegación y aproximación (NAVAID) deben cumplir los requisitos de precisión, continuidad, disponibilidad e integridad especificados para cada fase de vuelo.

Con el aumento del tránsito aéreo, las NAVAID convencionales no fueron capaces de brindar la flexibilidad necesaria en el espacio aéreo para absorber este crecimiento y satisfacer los requisitos arriba indicados.

El desarrollo de un sistema mundial que brindaba servicios de determinación de la posición y la hora —inicialmente por parte de Estados Unidos-- ofreció una alternativa a estas NAVAID convencionales, con la posibilidad de aplicar nuevos conceptos en la navegación aérea capaces de satisfacer las nuevas necesidades de la comunidad aeronáutica.

Con el desarrollo de nuevos conceptos y sistemas, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) introdujo el Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS), que permite la navegación en todas las fases de vuelo y la aproximación de precisión. De acuerdo con el Volumen 1 del Anexo 10 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (en adelante, denominado Anexo 10, vol.1), el GNSS está compuesto por:

- El Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS), que ofrece el Sistema de Determinación de la Posición Normalizado (*Standard Positioning System* - SPS);
- El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS), que ofrece la señal de navegación del Canal de Exactitud Normal (*Channel of Standard Accuracy* - CSA);
- El sistema de navegación basado en la aeronave (ABAS);
- El sistema de navegación basado en tierra (GBAS);
- El sistema regional de aumentación basado en tierra (GRAS); y
- Los receptores GNSS de a bordo.

La anterior lista enumera los sistemas de generación de la posición (las constelaciones principales), los receptores (con estos dos grupos siempre presentes en la navegación) y los sistemas de aumentación, que estarán presentes cuando las constelaciones principales, por sí solas, no puedan cumplir con los requisitos de la fase de vuelo.

Typical operation	Accuracy horizontal 95%	Accuracy vertical 95%	Integrity	Time-to-alert	Continuity	Availability
En-route	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-II)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Tabla 1 – Requisitos de performance de la señal en el espacio (Anexo 10, vol. 1, tabla 3.7.2.4-1)

2 El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS)

Tal como se indicó brevemente en la introducción, el GNSS comprende las constelaciones principales (GPS y GLONASS), ABAS, GBAS, GRAS y los receptores GNSS.

A fin de entender mejor el GBAS y ponerlo dentro del contexto del GNSS, es importante describir los otros componentes del sistema.

2.1 Principales constelaciones de satélites

Junto con los receptores, ésta es la parte básica del GNSS. Según el Anexo 10, son dos las constelaciones satelitales que han incorporado las Normas y Métodos Recomendados (SARP): El GPS de Estados Unidos, y el GLONASS de la Federación Rusa. Hay otras dos constelaciones en etapa de desarrollo: GALILEO (de Europa) y COMPASS (de China).

El GPS y el GLONASS tienen la capacidad de brindar información precisa sobre la posición y la hora a nivel mundial. La precisión que brindan ambos sistemas cumple con los requisitos de la aviación desde la etapa en ruta hasta la aproximación de no precisión, pero no cumplen con los requisitos de la aproximación de precisión.

Dada la importancia de las constelaciones principales, de conformidad con el Anexo 10, cualquier cambio en las SARP que requiera la sustitución o actualización del equipo GNSS requiere un aviso anticipado de seis años. Asimismo, se requiere un aviso anticipado de seis años por parte del proveedor de un sistema modular o de aumentación que tenga planes para dar por terminado el servicio brindado.

2.1.1 Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS)

El GPS es un sistema de radionavegación basado en satélites que emplea mediciones precisas de distancia desde los satélites GPS para determinar la posición y la hora en cualquier lugar del mundo. El sistema es operado por la Fuerza Aérea de Estados Unidos por cuenta del Gobierno de Estados Unidos. En 1994, Estados Unidos ofreció el servicio normalizado de determinación de la posición (SPS) del GPS para dar apoyo a las necesidades de la aviación civil internacional, y el Consejo de la OACI aceptó el ofrecimiento.

El diseño del segmento espacial del GPS comprende 24 satélites en seis planos orbitales. Los satélites operan en órbitas cuasi circulares de 20 200 km (10 900 NM) con un ángulo de inclinación de 55 grados con respecto al ecuador; cada satélite completa una órbita en aproximadamente 12 horas. El segmento de control del GPS tiene cinco estaciones monitoras y cuatro antenas terrestres con capacidad de enlace ascendente. Las estaciones monitoras utilizan un receptor GPS para rastrear pasivamente todos los satélites visibles, y acumulan datos sobre la distancia. La estación de control maestra procesa esta información para determinar la condición del reloj y la órbita de los satélites y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información actualizada es transmitida a los satélites a través de las antenas terrestres, que también son utilizadas para transmitir y recibir información de salud y control.

Los datos de navegación transmitidos por los satélites deberán incluir la información necesaria para determinar la hora de transmisión del satélite, la posición del satélite, la salud del satélite, la corrección del reloj del satélite, los efectos del retardo de propagación, transferencia de tiempo en UTC y la condición de la constelación.

El SPS del GPS, que utiliza un código de adquisición común (C/A) en la frecuencia L1 (1 575.42 MHz), está diseñado para brindar a usuarios civiles en todo el mundo la capacidad de determinar la posición en forma exacta. El servicio de posicionamiento preciso (PPS), que utiliza el código de precisión (código P) en una segunda frecuencia L2 (1 227.6 MHz), ofrece una capacidad de determinación de la posición más precisa, pero está codificado a fin de restringir su uso sólo a las agencias autorizadas.

El 1ro de mayo de 2000, Estados Unidos discontinuó el uso de la disponibilidad selectiva (SA) del GPS, lo cual dio como resultado una inmediata mejora en la precisión del SPS del GPS.

El Documento de Control de Interfaz (ICD), que se encuentra disponible en el portal <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>, define los requisitos relacionados con la interfaz entre el Segmento Espacial (SS) del GPS y el Segmento de Usuario de la Navegación.

El GPS utiliza el *datum* de referencia geodésico aprobado por la OACI (Sistema Geodésico Mundial 1984 - WGS-84).

	Global average 95% of the time	Worst site 95% of the time
Horizontal position error	13 m (43 ft)	36 m (118 ft)
Vertical position error	22 m (72 ft)	77 m (253 ft)

Tabla 2 – Exactitud de la posición del SPS del GPS (Anexo 10, vol. 1, párrafo 3.7.3.1.1.1)

2.1.2 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)

El GLONASS brinda determinación tridimensional de la posición y la velocidad en base a la medición del tiempo de tránsito y del efecto Doppler en las señales de radiofrecuencia (RF) transmitidas por los satélites del GLONASS. El sistema es operado por el Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. En 1996, la Federación Rusa ofreció el canal de exactitud normal (CSA) en apoyo de las necesidades de la aviación civil internacional, y el Consejo de la OACI aceptó el ofrecimiento.

El segmento espacial nominal del GLONASS consta de 24 satélites operacionales y varios de repuesto. Los satélites del GLONASS orbitan a una altitud de 19 100 km (10 310 NM) con un período orbital de 11 horas y 15 minutos. Debe haber ocho satélites espaciados a la misma distancia en cada uno de los tres planos orbitales, con una inclinación de 64.8 grados y un espaciamiento de 120 grados.

Un mensaje de navegación transmitido por cada satélite consta de las coordenadas del satélite, los componentes del vector de velocidad, correcciones de la hora del sistema GLONASS, e información sobre la salud del satélite. Se requiere las mediciones de un mínimo de cuatro satélites para poder establecer la posición tridimensional y la hora. Se requiere de las mediciones de un mínimo de tres satélites para determinar la posición bidimensional y la hora, si se conoce la altitud. El receptor del usuario puede rastrear estos satélites, ya sea en forma simultánea o secuencial. Los satélites del GLONASS transmiten en dos porciones de la banda L del espectro RF, y tienen dos códigos binarios, a saber, el código C/A y el código P, y el mensaje de datos. El GLONASS está basado en un concepto de acceso múltiple por división de frecuencias (FDMA). Los satélites del GLONASS transmiten señales de portadora a distintas frecuencias. Un receptor del GLONASS separa la totalidad de la señal entrante de todos los satélites visibles, asignando distintas frecuencias a sus canales de rastreo. El uso del FDMA le permite a cada satélite del GLONASS transmitir códigos P y códigos C/A idénticos.

El mensaje de datos de navegación brinda información individual sobre la condición del satélite que está transmitiendo, junto con información sobre el resto de la constelación satelital. Desde el punto de vista del usuario, los principales elementos de información en una transmisión satelital del GLONASS son los parámetros de corrección del reloj y la posición del satélite (efemérides). Las correcciones de reloj del GLONASS brindan datos que detallan la diferencia entre la hora individual del satélite y la hora del sistema GLONASS, que se conoce como Tiempo Universal Coordinado (UTC).

Los datos de efemérides incluyen la posición tridimensional fijada en la tierra y centrada en la tierra, la velocidad y aceleración para cada época de media hora de cada satélite. Para un tiempo de medición en algún punto entre las épocas de media hora, el usuario interpola las coordenadas del satélite utilizando la posición, velocidad y aceleración de las marcas de media hora antes y después del tiempo de medición.

El segmento de control del GLONASS realiza las funciones de monitoreo y control de los satélites, y determina los datos de navegación a ser modulados en las señales de navegación codificadas de los satélites. El segmento de control incluye una estación de control maestra y estaciones de monitoreo e ingreso de información. Los datos de medición de cada estación de monitoreo son procesados en la estación de control maestro, y son utilizados para computar los datos de navegación enviados a los satélites a través de la estación de ingreso de información. La operación del sistema requiere una sincronización de los relojes de los satélites con la hora del sistema GLONASS. A fin de lograr la sincronización requerida, la estación de control maestro proporciona los parámetros de corrección de tiempo.

El Documento de Control de Interfaz (ICD) para el GLONASS está disponible en el portal <http://www.glonass-center.ru>.

Como sistema geodésico, el GLONASS utiliza PZ-90 (sistema de coordenadas de los Parámetros de la Tierra 1990), y las SARP para el GNSS contenidas en el Anexo 10 incluyen una matriz de conversión del PZ-90 al WGS-84.

	Global average 95% of the time	Worst site 95% of the time
Horizontal position error	19 m (62 ft)	44 m (146 ft)
Vertical position error	29 m (96 ft)	93 m (308 ft)

Tabla 3 – Exactitud de la posición del CSA del GLONASS (Anexo 10, vol. 1 párrafo 3.7.3.2.1.1)

2.2 Receptores del GNSS

El receptor del GNSS está compuesto por una antena y un procesador que calcula la posición, hora y, posiblemente, otra información, dependiendo de la aplicación. Se requiere las mediciones de un mínimo de cuatro satélites para establecer la posición tridimensional y la hora. La exactitud depende de la precisión de las mediciones de los satélites y las posiciones relativas (geometría) de los satélites utilizados.

2.3 Sistemas de aumentación

Si bien las principales constelaciones y los receptores pueden proporcionar exactitud, continuidad, disponibilidad e integridad para satisfacer los requisitos desde la etapa en ruta hasta la aproximación de no precisión (NPA), en lo que respecta a la aproximación de precisión y a los procedimientos que exigen un mayor grado de exactitud o integridad, se necesita alguna fuente de aumentación para estos parámetros.

Los sistemas de aumentación enumerados en las SARP del Anexo 10 son ABAS, GRAS, SBAS y GBAS, los cuales se describen brevemente a continuación.

Con excepción del ABAS, la filosofía de los otros sistemas de aumentación está basada en el concepto de corrección diferencial, el cual utiliza receptores GNSS instalados en tierra y una posición definida en forma precisa para calcular el error de cada pseudodistancia, medida desde los satélites visibles de las constelaciones principales. El error calculado para cada satélite es luego transmitido de manera que los otros receptores puedan corregir la información proveniente de los satélites.

2.3.1 Sistema de aumentación basado en la aeronave (ABAS)

A principios de la década de 1990, muchos explotadores de aeronaves se apresuraron a adoptar el GNSS debido a la disponibilidad de receptores relativamente baratos del Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS). Los explotadores utilizaban estos receptores iniciales como ayuda para la navegación con reglas de vuelo visual (VFR) o reglas de vuelo por instrumentos (IFR). Pronto vieron los beneficios de contar con la capacidad de navegación de área (RNAV) a nivel mundial, y exigieron la aviónica que pudiera ser utilizada para la navegación IFR.

Las principales constelaciones de satélites no fueron desarrolladas teniendo en cuenta los estrictos requisitos de la navegación IFR. Por ello, la aviónica del GNSS que se utiliza en las operaciones IFR debería aumentar la señal GNSS para asegurar, entre otras cosas, su integridad. El ABAS aumenta y/o integra la información GNSS con información disponible a bordo de la aeronave, a fin de mejorar la actuación de las principales constelaciones de satélites.

La técnica ABAS más común se denomina vigilancia autónoma de la integridad en el receptor (RAIM). El RAIM requiere mediciones redundantes de distancia de los satélites con el fin de detectar señales defectuosas y alertar al piloto. El requisito de señales redundantes significa que la guía de navegación con integridad que brinda el RAIM puede no estar disponible 100 por ciento del tiempo. La disponibilidad RAIM depende del tipo de operación; para la aproximación de no precisión, es menor que para la operación terminal, y para la operación terminal es menor que para en ruta. Es por ello que las aprobaciones GPS/RAIM generalmente tienen restricciones operacionales. Otra técnica ABAS involucra la integración del GNSS con otros sensores de a bordo, tales como los sistemas de navegación inercial.

Muchos Estados han aprovechado el GPS/ABAS para mejorar el servicio, sin incurrir en gastos de infraestructura. El uso del GPS/ABAS es una primera etapa que vale la pena en una transición gradual hacia la guía GNSS para todas las fases del vuelo.

Algunos Estados también han aprobado el uso del GPS como el único servicio de navegación en áreas oceánicas y remotas. En este caso, la aviónica debería no sólo tener la capacidad de detectar al satélite defectuoso (mediante el RAIM), sino que también debería excluir dicho satélite y continuar brindando la guía. A esta característica se le denomina detección y exclusión de fallas (FDE). Bajo dicha aprobación, las aeronaves llevan sistemas duales y los explotadores realizan predicciones previas al vuelo para asegurarse que habrá suficientes satélites visibles para apoyar el vuelo proyectado. Esto ofrece a los explotadores una alternativa efectiva en términos de costo frente a los sistemas de navegación inercial en espacios aéreos oceánicos y remotos.

Algunas aeronaves equipadas con los actuales sistemas de navegación inercial han utilizado otra técnica ABAS que involucra la integración del GNSS con los datos inerciales. La combinación de la detección de fallas (FD) o la FDE del GNSS con la exactitud a corto plazo de los sistemas de navegación inercial modernos ofrece una mayor disponibilidad de la integridad del GNSS en todas las fases de vuelo.

Los algoritmos RAIM requieren un mínimo de cinco satélites visibles para detectar fallas y detectar la presencia de un error de posición inaceptablemente grande para un determinado modo de vuelo. La FDE utiliza un mínimo de seis satélites, no sólo para detectar un satélite defectuoso, sino también para excluirlo de la solución de navegación, de manera que la función de navegación pueda continuar en forma ininterrumpida.

Se puede utilizar un altímetro barométrico como medición adicional, de manera que se pueda reducir en uno la cantidad de fuentes telemétricas requeridas para RAIM y FDE. La ayuda barométrica también puede ayudar a mejorar la disponibilidad cuando hay suficientes satélites visibles, pero su geometría no es la adecuada para realizar la función de integridad. Los receptores GNSS básicos requieren el uso de ayuda barométrica para las operaciones de aproximación de no precisión.

2.3.2 Sistema regional de aumentación basado en tierra (GRAS)

El GRAS fue un sistema desarrollado conceptualmente, pero nunca se puso en funcionamiento debido a su complejidad y a los avances en los otros sistemas de aumentación.

El concepto se basaba en estaciones de referencia terrestres instaladas a lo largo de una amplia zona, en posiciones definidas con precisión, que transmitían la señal recibida a una estación maestra capaz de procesar toda la información y generar corrección de errores para cada información sobre pseudodistancia recibida de los satélites.

Luego, la estación maestra enviaba las correcciones a estaciones VHF ubicadas a lo largo de toda la zona de interés, que transmitían las correcciones de acuerdo con los satélites visibles en la zona de cobertura de cada estación VHF.

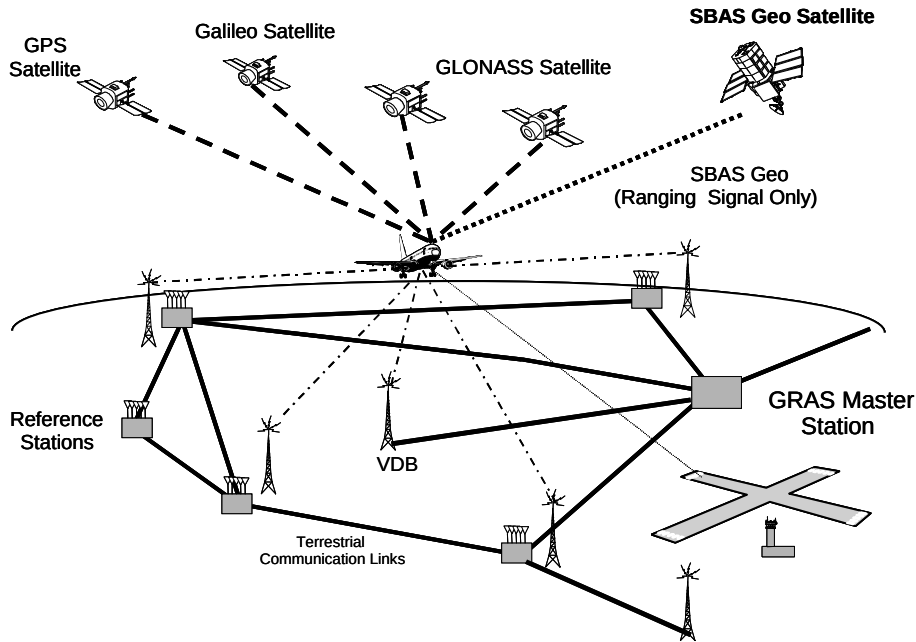


Figura 1 – Arquitectura del GRAS

2.3.3 Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS)

El SBAS aumenta las constelaciones principales de satélites al proporcionar información telemétrica, de integridad y corrección a través de los satélites geoestacionarios. El sistema comprende:

- a) una red de estaciones de referencia terrestres que monitorean las señales de los satélites;
- b) estaciones maestras que recolectan y procesan los datos de las estaciones y generan mensajes SBAS;
- c) estaciones de enlace ascendente que envían los mensajes a los satélites geoestacionarios; y
- d) transpondedores en estos satélites que transmiten los mensajes del SBAS.

Al brindar correcciones diferenciales, señales telemétricas adicionales a través de satélites geoestacionarios, e información de integridad para cada satélite de navegación, el SBAS brinda una disponibilidad de servicio mucho mayor que las constelaciones principales de satélites que sólo tienen ABAS. En ciertas configuraciones, el SBAS puede apoyar los procedimientos de aproximación con guía vertical (APV). Una aproximación SBAS no requiere infraestructura SBAS en el aeropuerto.

El SBAS puede apoyar toda operación RNAV en ruta y en área terminal. Es importante notar que el SBAS promete una capacidad RNAV de bajo costo para una amplia gama de usuarios. Esto les permitirá a los Estados reorganizar el espacio aéreo para lograr una máxima eficiencia y capacidad, permitiendo a las aeronaves seguir la trayectoria de vuelo más eficiente entre aeropuertos.

Existe un SBAS operativo, que es el Sistema de Aumentación de Área Amplia (de Estados Unidos), y varios otros que están en proceso de desarrollo: el Servicio Europeo de Complemento Geoestacionario de Navegación (EGNOS), el Sistema de navegación aumentada por GPS y órbita terrestre geoestacionaria (GEO) (GAGAN) de la India, el Sistema de aumentación basado en satélites (MSAS) de los Satélites de transporte multifuncionales (MTSAT) de Japón, y el Sistema de corrección diferencial y monitoreo (SDCM) de Rusia.

Las huellas de los satélites geoestacionarios definen la cobertura de un SBAS. Dentro del área de cobertura, los Estados pueden establecer áreas de servicios en las que el SBAS brindará apoyo a las operaciones aprobadas.

El SBAS puede verse afectado por el comportamiento de la ionósfera, reduciendo su exactitud de posición o, inclusive, interrumpiendo la señal. Los efectos de la ionósfera se discuten en la sección 3.3.6 de esta guía.

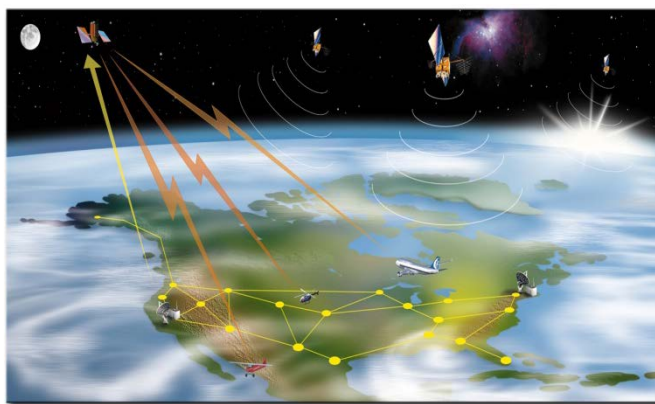


Figura 2 – Arquitectura del SBAS
(fuente <http://www.faa.gov>)

3 Sistema de aumentación basado en tierra (GBAS)

3.1 Descripción general

La actual constelación principal no puede brindar exactitud, disponibilidad, continuidad e integridad para efectuar aproximaciones de precisión. El GBAS utiliza el concepto de correcciones diferenciales para aumentar la señal satelital y así poder satisfacer estos requisitos.

El GBAS brinda aumentación a las constelaciones principales para permitir la aproximación de precisión hasta Categoría III.

Actualmente, el Anexo 10, volumen 1, contiene SARP para los SBAS que operan en una sola frecuencia y con una sola constelación para operaciones CAT I.

El Grupo de Expertos sobre Sistemas de Navegación (NSP) de la OACI ya ha desarrollado las SARP para CAT II/III, pero éstas aún no han sido incluidas en el Anexo 10, a la espera de avances en la industria.

El GBAS opera en base a tres segmentos: la constelación de satélites, la estación terrestre y el receptor de la aeronave, tal como se muestra en la Figura 3.

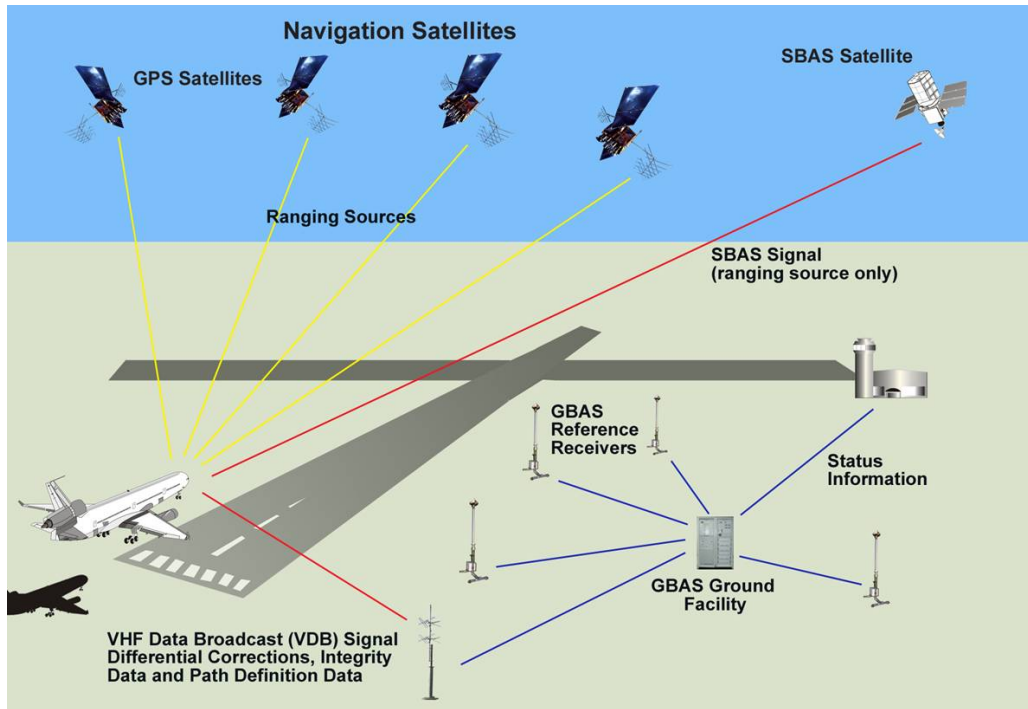


Figura 3 – Arquitectura del GBAS
(fuente <http://www.faa.gov>)

La estación terrestre del GBAS está conformada por receptores de referencia con antenas instaladas en puntos en los que se ha hecho un levantamiento topográfico preciso. La información generada en el receptor es enviada a un procesador que calcula las correcciones para cada satélite de navegación visible y transmite estas correcciones diferenciales, además de los parámetros de integridad y los datos sobre los puntos de la trayectoria de la aproximación de precisión, a través de una Transmisión de Datos de Muy Alta Frecuencia (VDB).

La difusión de información es recibida por las aeronaves bajo la cobertura VHF, que también reciben información de los satélites de navegación. Luego, utiliza las correcciones diferenciales de la información recibida directamente de los satélites de navegación para calcular la posición precisa.

La posición precisa, junto con los datos de los puntos de la trayectoria, se utilizan para brindar señales de desviación a los sistemas apropiados en la aeronave que apoyan las operaciones de aproximación de precisión.

La indicación de aproximación del GBAS que recibe el piloto es similar a las indicaciones de rumbo y trayectoria de planeo del ILS.

3.2 Beneficios del GBAS

En comparación con otros sistemas de aproximación de precisión, el GBAS ofrece muchos beneficios:

- Reducción de las zonas críticas y sensibles;
- Aproximación en curva;
- Servicio de determinación de la posición;
- Suministro del servicio en varias pistas del mismo aeropuerto;

- Suministro de varios ángulos de planeo de aproximación y umbral desplazado;
- Aproximación frustrada guiada; y
- Uso en aeropuertos adyacentes.
-

3.2.1 Reducción de las zonas críticas y sensibles

El localizador y la pendiente de planeo tienen patrones de radiación definidos, los cuales son esenciales para la composición de las señales de navegación y, por ende, para la precisión de la señal recibida por la aeronave. Cualquier alteración del patrón causará desviaciones en la señal.

A fin de garantizar que la señal ILS no se vea alterada durante las aproximaciones por instrumentos, se creó zonas críticas y sensibles, las cuales aparecen descritas en el Anexo 10, Volumen 1.

No obstante, la creación de zonas críticas y sensibles genera un impacto operacional, con restricciones durante la aproximación de la aeronave.

Tomando en cuenta que el GBAS no utiliza patrones de antena para componer la señal de navegación, las restricciones del emplazamiento están más relacionadas con el bloqueo de la señal y el efecto de trayectos múltiples, reduciendo significativamente el impacto operacional de las zonas críticas y sensibles y aumentando la capacidad operacional en comparación con otros sistemas de aproximación de precisión.

3.2.2 Aproximación en curva

El GBAS permite el uso de aproximaciones en curva guiadas, con guía tanto lateral como vertical.

Esta es una característica importante en caso sea necesario crear procedimientos para evitar que las aeronaves vuelen sobre áreas específicas cercanas a aeropuertos, por motivos de ruido sobre zonas urbanas, o inclusive para evitar obstáculos.

Esta capacidad ha sido demostrada en vuelos de prueba en varios aeropuertos, pero el Anexo 10 no contiene SARP sobre un piloto automático capaz de ejecutar el procedimiento automático, lo cual deberá ser una requisito en vista de la complejidad de este tipo de procedimiento.

La Administración Federal de Aviación (FAA) denomina a esta capacidad “trayectoria de aproximación terminal” (*Terminal Approach Path* - TAP).

3.2.3 Servicio de determinación de la posición

El servicio de determinación de la posición del GBAS brinda información sobre la posición horizontal, en apoyo de las operaciones RNAV dentro de la zona de servicio.

Esta característica permite mejorar la precisión de la información de posición y reducir la separación entre aeronaves en el área terminal.

3.2.4 Suministro del servicio en varias pistas del mismo aeropuerto

De conformidad con las SARP sobre el GBAS, el sistema puede ser configurado para difundir un máximo de 48 aproximaciones con distintas configuraciones, pudiendo atender a distintas pistas con diferentes parámetros de aproximación (ver la Tabla 7).

3.2.5 Suministro de varios ángulos de planeo de aproximación y umbral desplazado

Las 48 distintas aproximaciones que pueden ser difundidas por un solo GBAS pueden estar configuradas con diferentes parámetros (ver la Tabla 7). En cada bloque de datos del Tramo de Aproximación Final (FAS) que se transmite, los parámetros como ángulo de planeo y trayectoria de planeo pueden ser configurados de diferente manera. La radiodifusión de distintos ángulos de planeo a la misma pista permite elegir las aproximaciones que mejor se ajusten a cada tipo de aeronave que opera en el aeropuerto.

Si hay necesidad de desplazar el umbral, el GBAS puede ser configurado rápidamente para dar apoyo al nuevo umbral, a diferencia del ILS, que tiene que ser movido físicamente para atender a la nueva posición.

3.2.6 Aproximación frustrada con guía

Esta es una característica que no está definida en las SARP, pero que puede ser proporcionada por el GBAS, mejorando así la seguridad de las aproximaciones frustradas.

3.2.7 Uso en aeropuertos adyacentes

La estructura del bloque de datos del FAS permite a la misma estación GBAS brindar servicio a distintos aeropuertos (ver la Tabla 7), los cuales tienen que estar dentro de la cobertura de la señal VDB transmitida.

3.3 Información técnica básica del GBAS

De conformidad con el Anexo 10, vol. 1, el GBAS tiene por objeto dar apoyo a todos los tipos de aproximación, aterrizaje, salida y operaciones en tierra, y puede apoyar operaciones en ruta y terminales.

Las SARP desarrolladas hasta la fecha apoyan las aproximaciones de precisión Categoría I, aproximaciones con guía vertical y el servicio de determinación de la posición del GBAS.

La estación terrestre del GBAS cumple las siguientes funciones:

- Proporcionar correcciones de seudodistancia de relevancia local;
- Suministrar datos relacionados con el GBAS;
- Suministrar datos sobre el tramo de aproximación final cuando se esté dando apoyo a las aproximaciones de precisión;
- Suministrar datos sobre la disponibilidad de la fuente telemétrica; y
- Brindar monitoreo de la integridad de las fuentes telemétricas del GNSS.

La cobertura deberá ser capaz de apoyar el nivel de servicio requerido en áreas específicas, con una cobertura mínima, tal como se ilustra en la Figura 4 – Cobertura mínima del GBAS (Anexo 10, vol. 1, fig. D-4)

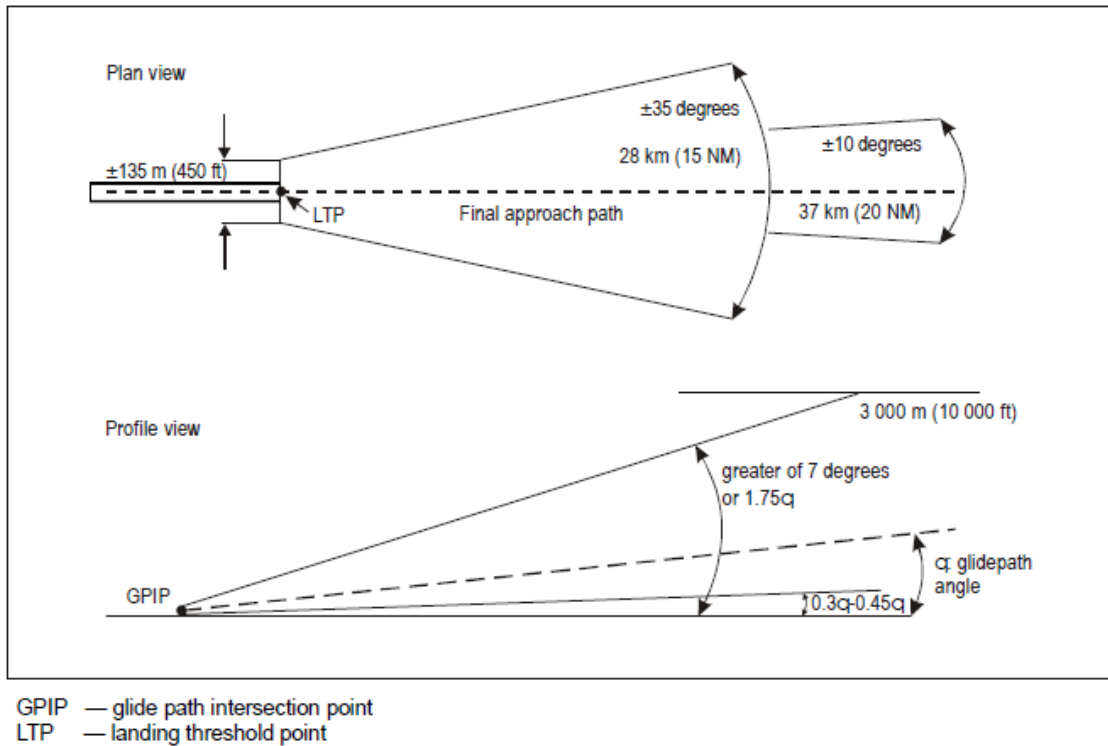


Figura 4 – Cobertura mínima del GBAS (Anexo 10, vol. 1, fig. D-4)

Frecuencias VDB – Las frecuencias de radiodifusión de datos utilizadas en el GBAS son seleccionadas de las radiofrecuencias en la banda de 108 a 117.975. La frecuencia mínima asignable es 108.025 MHz y la frecuencia máxima asignable es 117.950 MHz. La separación entre frecuencias asignables (separación entre canales) es de 25 kHz.

Técnica de acceso – Se utiliza una técnica de acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA) con una estructura de trama fija. Se asigna a la radiodifusión de datos de uno a ocho intervalos.

Modulación – Se transmite los datos del GBAS como símbolos de 3 bits, modulándose la portadora de radiodifusión de datos por D8PSK, a una velocidad de transmisión de 10 500 símbolos por segundo.

Polarización – El GBAS puede proporcionar una radiodifusión de datos VHF con polarización ya sea horizontal (GBAS/H) o elíptica (GBAS/E).

Información para la navegación – Entre los datos de navegación transmitidos por el GBAS se incluye la siguiente información:

- a) correcciones de pseudodistancia, hora de referencia y datos de integridad;
- b) datos relacionados con el GBAS;
- c) datos sobre el tramo de aproximación final cuando se presta apoyo a aproximaciones de precisión; y
- d) datos sobre disponibilidad pronosticada de fuente telemétrica.

3.3.1 Contenido de los datos

Los tipos de mensajes que pueden ser transmitidos por el GBAS son los que aparecen en la Tabla 4.

Message type identifier	Message name
0	Spare
1	Pseudo-range corrections
2	GBAS-related data
3	Reserved for ground-based ranging source
4	Final approach segment (FAS) data
5	Predicted ranging source availability
6	Reserved
7	Reserved for national applications
8	Reserved for test applications
9 to 100	Spare
101	GRAS pseudo-range corrections
102 to 255	Spare

Tabla 4 – Mensajes de radiodifusión de datos VHF de GBAS (Anexo 10, vol. 1, Tabla B-63)

3.3.1.1 Mensaje de tipo 1

El mensaje de tipo 1 proporciona los datos de corrección diferencial para las fuentes telemétricas GNSS particulares. El mensaje consta de tres secciones:

- información del mensaje (hora de validez, bandera adicional de mensaje, número de mediciones y tipo de medición);
- información de baja frecuencia (parámetro de descorrelación de efemérides, verificación por redundancia cíclica (CRC) de efemérides de satélite e información de disponibilidad de satélites);
y
- bloques de medición de datos de satélite.

Data content	Bits used	Range of values	Resolution
Modified Z-count	14	0 to 1 199.9 s	0.1 s
Additional message flag	2	0 to 3	1
Number of measurements (N)	5	0 to 18	1
Measurement type	3	0 to 7	1
Ephemeris decorrelation parameter (P)	8	0 to 1.275×10^{-3} m/m	5×10^{-6} m/m
Ephemeris CRC	16	—	—
Source availability duration	8	0 to 2 540 s	10 s
For N measurement blocks			
Ranging source ID	8	1 to 255	1
Issue of data (IOD)	8	0 to 255	1
Pseudo-range correction (PRC)	16	± 327.67 m	0.01 m
Range rate correction (RRC)	16	± 32.767 m/s	0.001 m/s
σ_{PR_gnd}	8	0 to 5.08 m	0.02 m
B ₁	8	± 6.35 m	0.05 m
B ₂	8	± 6.35 m	0.05 m
B ₃	8	± 6.35 m	0.05 m
B ₄	8	± 6.35 m	0.05 m

Tabla 5 – Mensajes de correcciones de pseudodistancia de tipo 1 (Anexo 10, vol. 1, tabla B-70)

3.3.1.2 Mensaje de tipo 2

El mensaje de tipo 2 identifica el emplazamiento del punto de referencia GBAS al que se aplican las correcciones proporcionadas por el GBAS y proporciona otros datos relacionados con el GBAS, según la Tabla 6.

Data content	Bits used	Range of values	Resolution
GBAS reference receivers	2	2 to 4	—
Ground accuracy designator letter	2	—	—
Spare	1	—	—
GBAS continuity/integrity designator	3	0 to 7	1
Local magnetic variation	11	$\pm 180^\circ$	0.25°
Spare	5	—	—
$G_{\text{vert_iono_gradient}}$	8	0 to 25.5×10^{-6} m/m	0.1×10^{-6} m/m
Refractivity index	8	16 to 781	3
Scale height	8	0 to 25 500 m	100 m
Refractivity uncertainty	8	0 to 255	1
Latitude	32	$\pm 90.0^\circ$	0.0005 arcsec
Longitude	32	$\pm 180.0^\circ$	0.0005 arcsec
GBAS reference point height	24	$\pm 83\,886.07$ m	0.01 m
Additional data block 1 (if provided)			
Reference station data selector	8	0 to 48	1
Maximum use distance (D_{max})	8	2 to 510 km	2 km
$K_{\text{md_e_POS,GPS}}$	8	0 to 12.75	0.05
$K_{\text{md_e_GPS}}$	8	0 to 12.75	0.05
$K_{\text{md_e_POS,GLONASS}}$	8	0 to 12.75	0.05
$K_{\text{md_e_GLONASS}}$	8	0 to 12.75	0.05
Additional data block 2 (if provided)			
Additional data block length	8	2 to 255	1
Additional data block number	8	2 to 255	1
Additional data parameters	Variable	—	—

Tabla 6 – Mensaje de datos relativos a GBAS de tipo 2 (Anexo 10, vol. 1, Tabla B-71)

3.3.1.3 Mensaje de tipo 4

El mensaje de tipo 4 contiene uno o más conjuntos de datos del Tramo de Aproximación Final (FAS), cada uno definiendo una sola aproximación de precisión. Cada conjunto de datos de mensaje de tipo 4 incluye lo siguiente:

- Longitud del conjunto de datos;
- Bloque de datos FAS – el conjunto de parámetros para identificar una sola aproximación de precisión ó APV y definir su trayectoria de aproximación asociada;
- Estado de aproximación FASVAL; y
- Estado de aproximación FASLAL.

Data content	Bits used	Range of values	Resolution
Operation type	4	0 to 15	1
SBAS provider ID	4	0 to 15	1
Airport ID	32	—	—
Runway number	6	0 to 36	1
Runway letter	2	—	—
Approach performance designator	3	0 to 7	1
Route indicator	5	—	—
Reference path data selector	8	0 to 48	1
Reference path identifier	32	—	—
LTP/FTP latitude	32	±90.0°	0.0005 arcsec
LTP/FTP longitude	32	±180.0°	0.0005 arcsec
LTP/FTP height	16	-512.0 to 6 041.5 m	0.1 m
ΔFPAP latitude	24	±1.0°	0.0005 arcsec
ΔFPAP longitude	24	±1.0°	0.0005 arcsec
Approach TCH (Note 2)	15	0 to 1 638.35 m or 0 to 3 276.7 ft	0.05 m or 0.1 ft
Approach TCH units selector	1	—	—
GPA	16	0 to 90.0°	0.01°
Course width (Note 1)	8	80 to 143.75 m	0.25 m
ΔLength offset	8	0 to 2 032 m	8 m
Final approach segment CRC	32	—	—

Note 1.— When the runway number is set to 0, then the course width field is ignored and the course width is 38 metres.

Note 2.— Information can be provided in either feet or metres as indicated by the approach TCH unit selector.

Tabla 7 – Bloque de datos del tramo de aproximación final (FAS) (Anexo 10, v. 1, Tabla B-66)

3.3.2 Número de canal

Cada aproximación GBAS transmitida desde el subsistema de tierra está asociada a un número de canal en la gama de 20 001 a 39 999. El servicio de determinación de la posición GBAS, si se proporciona, está asociado a un número de canal aparte, en la gama de 20 001 a 39 999. El número de canal está dado por:

$$\text{Número de canal} = 20\,000 + 40(F - 108.0) + 411(S)$$

donde

F = frecuencia de radiodifusión de datos (MHz)

S = RPDS ó RSDS

RPDS = selector de datos de trayectoria de referencia para el bloque de datos FAS

RSDS = selector de datos de la estación de referencia para el subsistema de tierra GBAS.

3.3.3 Receptor GBAS

El término “receptor GBAS” designa la aviónica del GNSS que, como mínimo, cumple con los requisitos para un receptor GBAS, según lo especificado en el Anexo 10, vol. 1, y las especificaciones del RTCA/DO-253A, enmendadas por la FAA TSO pertinente de Estados Unidos (o equivalente).

Las aeronaves deben tener la capacidad de recibir la señal de los satélites de navegación y la información VDB, con las respectivas antenas, y una forma de seleccionar la aproximación y una indicación de rumbo y trayectoria de planeo.

Como en el caso del ILS y el sistema de aterrizaje por microondas (MLS), el GBAS proporcionará guía lateral y vertical en relación al rumbo y trayectoria de planeo de la aproximación final definida. El receptor GBAS utilizará un esquema de canalización que selecciona la frecuencia VDB. Los datos del procedimiento de aproximación son enviados por enlace ascendente a través de VDB. Cada procedimiento individual requiere una asignación de canal individual.

Las normas relacionadas con la aviónica del GBAS han sido desarrolladas imitando al ILS en términos de la integración de los sistemas de a bordo, con el fin de minimizar el impacto de la instalación del GBAS en la aviónica existente. Por ejemplo, la escala de las visualizaciones en pantalla y la información sobre desviaciones serán equivalentes al ILS. Toda la aviónica proporcionará guía de rumbo y trayectoria de planeo de la aproximación final a todas las configuraciones de estaciones terrestres.

El servicio de determinación de la posición del GBAS proporcionará datos de posición, velocidad y hora que podrán ser utilizados como insumos en un navegador de a bordo.

De conformidad con las SARP de la OACI y la estrategia para la introducción y aplicación de ayudas no visuales para la aproximación y el aterrizaje que permitan una combinación de sistemas que brinden el servicio de aproximación de precisión, la industria ha desarrollado el receptor multimodo. Este receptor puede prestar apoyo a las operaciones de aproximación de precisión basadas en ILS, MLS y GNSS (GBAS y SBAS).

En cuando al GBAS, la vigilancia de la integridad se logra a través de una comparación constante que realiza la aviónica entre los niveles de protección horizontal/lateral y vertical (HPL/LPL y VPL), derivados de la señal de aumentación y de las mediciones de pseudodistancia de los satélites, y el límite de alerta para la actual fase de vuelo. Cuando se excede ya sea el límite vertical o el horizontal, se envía una alerta al piloto. Para una aproximación de precisión, el receptor GBAS de a bordo sólo utiliza los satélites para los que hay correcciones disponibles.

3.3.4 Consideraciones en cuanto al emplazamiento

La instalación de un subsistema de tierra GBAS implica consideraciones especiales en cuanto a la selección de posibles emplazamientos para las antenas del receptor de referencia y de la(s) antena(s) VDB. Al planificar el emplazamiento de las antenas, debe satisfacerse los requisitos de limitación de obstáculos del Anexo 14.

Debería seleccionarse el emplazamiento en una zona libre de obstáculos de forma que puedan recibirse las señales de satélite a ángulos de elevación lo más bajo posibles. En general, todo lo que enmascare a los satélites GNSS a ángulos de elevación superiores a 5° degradará la disponibilidad del sistema.

Debe diseñarse y emplazarse las antenas de los receptores de referencia de modo que limiten las señales de multitrayectos que interfieran con la señal deseada. El montaje de las antenas cerca de un plano de tierra disminuye los multitrayectos de largo retardo que resultan de reflexiones por debajo de la antena. La altura de montaje debería ser suficiente para evitar que la antena sea cubierta por nieve o sea objeto de interferencias por parte del personal de mantenimiento o del tráfico de tierra. Las antenas deberían emplazarse de forma que cualquier estructura metálica, tal como salidas de ventilación, tuberías y otras antenas, estén fuera de los efectos de campo cercano de las antenas.

Además de considerarse la magnitud del error por multitrayectos en cada emplazamiento de antena de receptor de referencia, debe también tenerse en cuenta el grado de correlación. Las antenas del receptor de referencia deberían estar emplazadas en lugares que proporcionen entornos independientes de multitrayectos.

La instalación de cada antena debería incluir un montaje que no se doble con el viento o bajo cargas de hielo.

Debería emplazarse las antenas del receptor de referencia en una zona de acceso controlado. El tráfico puede contribuir al error por multitrayectos, u obstaculizar la vista de los satélites desde las antenas.

La antena VDB debería estar situada de forma que exista una línea de alcance óptico sin obstáculos desde la antena hasta cualquier punto dentro del volumen de cobertura de cada FAS al que se preste apoyo. Debería prestarse atención también a asegurar la separación mínima entre transmisor y receptor, de forma que no exceda la intensidad máxima de campo. Para proporcionar la cobertura requerida de múltiples FAS en un determinado aeropuerto, y para que haya flexibilidad en el emplazamiento de la antena VDB, podría ser necesario que el volumen actual de cobertura en torno a la antena del transmisor sea de dimensiones considerablemente superiores a las requeridas para un solo FAS. La capacidad de proporcionar esta cobertura depende del emplazamiento de la antena VDB respecto a la pista y de la altura de la antena VDB. En general, una mayor altura de la antena puede ser necesaria para proporcionar una intensidad adecuada de la señal a los usuarios a bajas altitudes, pero también puede llevar a unos nulos por multitrayectos inaceptables dentro del volumen deseado de cobertura. Debe llegarse a un compromiso con respecto a la altura conveniente de la antena, basándose en los análisis, para asegurar que se satisfacen, dentro del volumen de cobertura, los requisitos de intensidad de la señal. Debe también prestarse atención al efecto de las características del terreno y de los edificios en el entorno de multitrayectos.

3.3.5 Problemas de interferencia en las frecuencias

El GBAS opera con las frecuencias de los satélites de navegación y las frecuencias VHF para la transmisión de la información. Ambas bandas de frecuencia están sujetas a interferencia que podría inclusive bloquear la señal.

Es bien sabido que las causas de interferencia en la banda 108-118MHz afectan al VOR y a los Localizadores.

En la banda de los satélites de navegación, la señal es muy débil (-160dBm) y, por lo tanto, está sujeta a interferencia.

Se ha observado interferencia en el GBAS dentro de la banda de los satélites de navegación en aeropuertos de Estados Unidos y Alemania, causada por repetidores del GNSS y bloqueadores del GNSS (“jammers”).

3.3.6 Influencia de la ionósfera

La ionósfera afecta a las señales difundidas por el GNSS (principales constelaciones de satélites y satélites geostacionarios del SBAS) en dos formas: retarda la propagación de la modulación (es decir, el código que transporta la señal a partir de la cual se hace las mediciones de pseudodistancia) y, en algunas regiones, puede causar rápidas fluctuaciones en la potencia y fase de la señal recibida. El primer efecto se conoce como “retardo de grupo”, y el segundo como “centelleo ionosférico”. Mientras los errores en las mediciones de pseudodistancia causados por el retardo de grupo típicamente son del orden de una cuantas décimas de un metro, en raras ocasiones pueden exceder los 100 m.

El comportamiento de la ionósfera, en lo que respecta a los efectos observables sobre las señales de radio, varía con la hora y el emplazamiento. Debido a que la ionización de la atmósfera superior es causada por las radiaciones del sol, la densidad y distribución de altitud de los electrones libres que contiene varían con el ciclo solar de 11 años, la temporada del año y la hora del día. También varían en función de la latitud geomagnética. Finalmente, se pueden ver alteradas severamente por tormentas geomagnéticas (ionosféricas) inusuales causadas por poderosas emisiones energéticas del sol.

En general, los efectos ionosféricos en las regiones de latitudes intermedias son leves: las variaciones en los retardos ionosféricos son graduales y el centelleo ionosférico es virtualmente inexistente. Esto puede no ser así durante tormentas ionosféricas (geomagnéticas) severas, pero estas tormentas son muy inusuales, y sus efectos pueden ser detectados (y, a veces, corregidos) por los sistemas de aumentación. En las regiones de latitudes bajas, los efectos ionosféricos son más graves: son frecuentes las grandes variaciones, retardos ionosféricos y parches que causan un intenso centelleo ionosférico de amplitud y fase, especialmente durante las horas de la tarde, en años cercanos al pico del ciclo solar. Asimismo, pueden ocurrir fuertes gradientes de retardo ionosférico en los bordes de una profunda depleción ionosférica, también conocida como burbuja ionosférica. En las regiones de alta latitud, los efectos ionosféricos son más graves que en las regiones de latitud intermedia, pero menos severos que en las regiones de baja latitud. Esto se debe a las magnitudes de los retardos ionosféricos, que, si bien presentan cierta variación, tienden a ser mucho más pequeñas que en las regiones de baja latitud. También puede presentarse centelleo ionosférico en las regiones de alta latitud, especialmente durante períodos de mayor actividad ionosférica. Mayormente, esto ocurre en la forma de centelleo ionosférico de fase en estas regiones.

Los distintos sistemas GNSS utilizan diferentes enfoques para la corrección de los retardos ionosféricos.

Los sistemas de aviónica GBAS de una sola frecuencia corrigen los efectos combinados de múltiples fuentes de error en forma simultánea, incluyendo los errores de efemérides y reloj de los satélites, los errores por retardo ionosférico, y los errores por retardo troposférico, utilizando las correcciones diferenciales difundidas por una estación terrestre GBAS. Este enfoque de corrección por retardos ionosféricos es apropiado para las aproximaciones de precisión de Categoría I.

La función de radiodifusión de datos VHF del GBAS difunde mensajes que contienen correcciones de pseudodistancia para todos los satélites visibles. Cuando son aplicadas, estas correcciones eliminan o, por lo menos, reducen significativamente la mayor parte de los errores comunes (por ejemplo, el retardo ionosférico) entre tierra y las aeronaves. Asimismo, los mensajes también contienen parámetros que caracterizan las incertidumbres en estas correcciones. Las ecuaciones utilizadas en la aviónica se sustentan en estos parámetros para calcular los niveles de protección. Estos niveles de protección son luego comparados con los límites máximos de alerta para dicha estación y para la operación de vuelo deseada.

Una limitación clave de las correcciones GBAS es la separación espacial entre la estación GBAS en tierra y el usuario GBAS en la aeronave, ya que las correcciones difundidas a las aeronaves sólo pueden corregir los errores comunes. El principal problema aquí se relaciona con el retardo ionosférico, el cual puede variar en función de la distancia. La diferencia tiende a ser pequeña en distancias cortas típicas del área local bajo condiciones ionosféricas nominales en las latitudes intermedias. (Sin embargo, esto no es necesariamente así en la zona ecuatorial, donde las variaciones pueden ser grandes, inclusive en un área local.) Las condiciones asociadas con tormentas ionosféricas severas en latitudes intermedias son un caso diferente. En este caso, la magnitud del retardo puede variar con bastante rapidez en distancias cortas, por lo que tal vez no sean mitigadas debidamente, ni siquiera luego de aplicar las correcciones de la estación GBAS en tierra. Esto representa un gran desafío para el cumplimiento de los requisitos de CAT I y un gran problema de diseño para las CAT II/III, dados los requisitos de precisión e integridad más estrictos que se aplican a estas operaciones. El principal desafío es demostrar debidamente que el sistema es capaz de satisfacer los requisitos de integridad y disponibilidad durante tormentas ionosféricas severas, cuando los retardos ionosféricos pueden variar rápidamente en términos de tiempo y espacio.

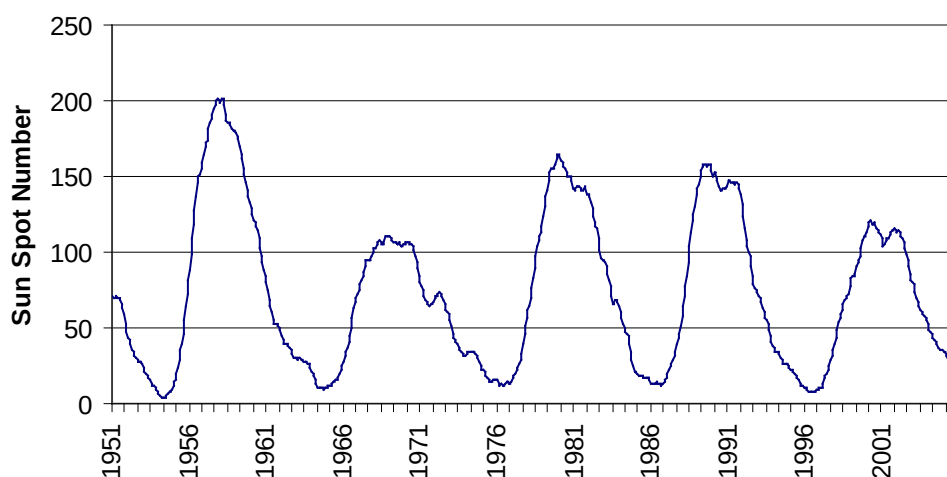


Figura 5 – Actividad solar
(fuente <http://www.swpc.noaa.gov/>)

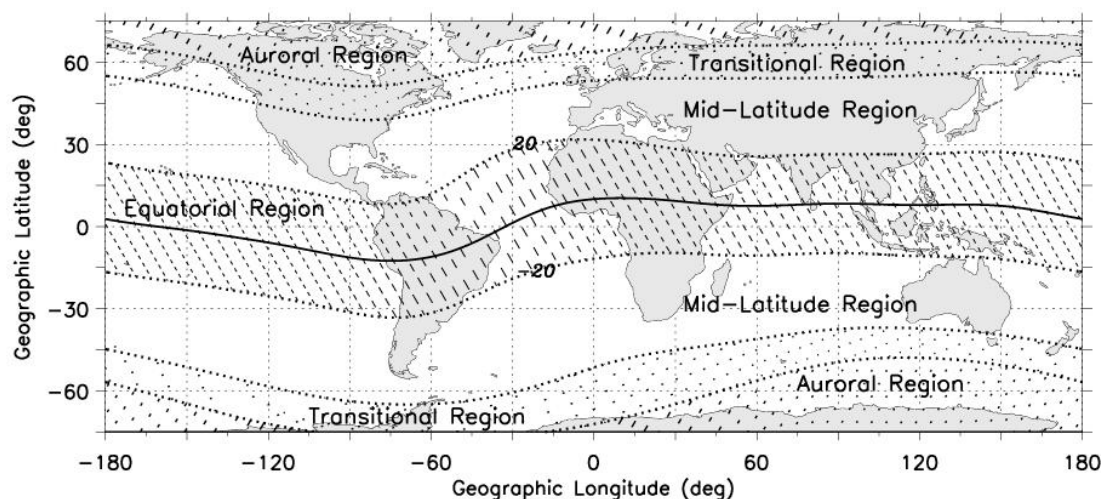


Figura 6 – Regiones ionosféricas

3.4 Desarrollo del GBAS

El GBAS fue incluido en el Anexo 10, Volumen 1, mediante la Enmienda 76, elaborada por el Grupo de Expertos sobre el Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSSP) de la OACI, que luego se convirtió en el actual Grupo de Expertos sobre Sistemas de Navegación (NSP).

Varias agencias gubernamentales, industrias y universidades trabajan en el desarrollo de estaciones GBAS en tierra y receptores de a bordo, y en la implementación operacional del sistema.



Figura 7 – Estaciones del GBAS
(fuente www.flygls.net)

3.4.1 Grupo de Trabajo Internacional del GBAS (IGWG)

Desde 2004, La Administración Federal de Aviación y Eurocontrol presiden las reuniones del Grupo de Trabajo Internacional del GBAS, en las que participan los proveedores de servicios de navegación aérea, las autoridades de certificación, las líneas aéreas, las industrias aeronáuticas, las universidades y otros.

La finalidad del IGWG es compartir información sobre la implementación y desarrollo del GBAS. En febrero de 2011, el IGWG celebró su 11ª reunión.

La información del IGWG aparece en <https://extranet.eurocontrol.int>.

3.4.2 Fabricantes de estaciones GBAS

Varias universidades y empresas están desarrollando estaciones terrestres GBAS. Para mediados de 2011, sólo Honeywell tenía una estación certificada (SLS-4000).

Varias otras compañías están trabajando en proyectos GBAS: IACIT, SELEX, NPPF Spectr, Indra, Thales, NEC, Park Air, GM Merck y otros.

3.4.3 Fabricantes de receptores GBAS

Las compañías de aviónica están desarrollando receptores multimodo (MMR), los cuales están conformados por varios receptores en la misma caja (VOR, ILS, GNSS). Esto resulta de interés para el ahorro de espacio y peso en las aeronaves. Rockwell-Collins tiene su GLU-925 (unidad de aterrizaje GNSS), la cual está certificada para operaciones GBAS CAT I. Honeywell está desarrollando un receptor integrado de navegación (INR).

Si bien el MMR es un buen concepto, también es costoso. La aviación general no cuenta con un solo receptor GBAS.

3.4.4 El GBAS en los fabricantes de aeronaves

Los grandes fabricantes de aeronaves (Boeing and Airbus) ya han implementado la capacidad de aterrizaje GBAS en varias de sus aeronaves.

Airbus ofrece GBAS CAT I como algo opcional a sus clientes en los A380, A350 y A320. Para el A330 y el A340, aún está trabajando en su aprobación operacional.

Boeing ofrece GBAS CAT I como algo opcional en el B737-NG y como un elemento regular en los B747-8 y B787.

3.5 Consideraciones para la implementación del GBAS

La implementación de operaciones GBAS exige una serie de actividades para poder lograr un proceso eficiente.

3.5.1 Planificación de la implementación

La decisión de instalar un GBAS afecta a varias áreas de la comunidad aeronáutica y debe ir precedida por un detallado análisis del escenario.

Se debe llevar a cabo un estudio para identificar a los aeropuertos en los que se puede efectuar la implementación, seguido por un análisis costo-beneficio (CBA) de la implementación.

El CBA debe tomar en cuenta varios aspectos, tales como:

- ✓ La cantidad de aeronaves listas para operar el GBAS;
- ✓ La cantidad de explotadores de aeronaves comprometidos con la adquisición/modernización de aeronaves con capacidad GBAS;
- ✓ Un análisis estadístico de las condiciones meteorológicas;
- ✓ Una evaluación del crecimiento del tránsito aéreo;
- ✓ Las NAVAID que existen para brindar apoyo a las aproximaciones no visuales;
- ✓ Los planes para cambiar las NAVAID existentes;
- ✓ Una evaluación de los verdaderos requisitos operacionales en el aeropuerto.

3.5.2 Análisis del impacto de la ionósfera sobre el GBAS

La ionósfera es un desafío para la implementación del GBAS. Bajo condiciones normales, esta capa de la atmósfera ya ocasiona retardos en las señales de los satélites GPS, lo cual varía dependiendo de la región del globo de que se trate.

La Región SAM, ubicada en los alrededores del ecuador geomagnético, sufre un gran impacto de la ionósfera, especialmente con los fenómenos de centelleo ionosférico y burbujas de plasma, los cuales pueden ocasionar errores en los receptores e, inclusive, ocasionar la pérdida de información proveniente de los satélites.

La Universidad de Stanford ha desarrollado un modelo de amenaza para aumentar la disponibilidad de las estaciones GBAS, en base a la disposición geométrica de los satélites en el espacio. Asimismo, ha modelado gradientes ionosféricas de configuración anormal en la forma de frentes lineales de onda semi-infinitos, con una velocidad de propagación constante. La gradiente se asume como una variación lineal en el retardo ionosférico vertical entre un máximo y un mínimo (<http://waas.stanford.edu/~wwwu/papers/gps/PDF/LeeIONGNSS06.pdf>).

Así, hay tres parámetros que son esenciales en este modelo de amenaza:

- La diferencia de retardo entre dos puntos;
- La distancia entre los puntos;
- La velocidad del frente de onda.

No obstante, a la fecha, este modelo de amenaza sólo se aplica a la arquitectura de la estación Honeywell SLS-4000 y se aplicó únicamente con datos recolectados en la parte continental de Estados Unidos, y es válido para las regiones de latitudes intermedias.

Un Estado que adquiere una estación de otra compañía debe asegurarse que tenga la misma certificación de equipo, de conformidad con los requisitos de exactitud, disponibilidad, continuidad e integridad para la fase de vuelo a la que brindará apoyo, inclusive bajo condiciones ionosféricas hostiles. Debe quedar claro que los fabricantes pueden utilizar un modelo de amenaza diferente en sus sistemas, y deben estar certificados de conformidad con las regulaciones del Estado.

Es posible que, para asegurar que un sistema GBAS sea lo suficientemente robusto como para operar a bajas latitudes, se requiera simulaciones o, inclusive, pruebas frente a los eventos reales de la ionósfera. El problema de utilizar eventos reales es que son impredecibles, y los períodos de gran actividad solar, cuando estos eventos son más frecuentes, ocurren cada 11 años.

Un Estado que desee convalidar el modelo de amenaza de Stanford para una región específica debería establecer una estructura que permita la recolección de datos de los satélites GPS a fin de identificar y medir las gradientes de la ionósfera y sus velocidades. Para ello, es necesario:

1- Instalar receptores GPS alrededor del área de interés

Debe haber una gran cantidad de receptores para permitir la identificación de los retardos en diversos puntos de la ionósfera.

Los receptores deben estar espaciados a no más de 100 km a fin de brindar una buena definición de las gradientes calculadas.

Los receptores deben ser capaces de recibir frecuencias L1 y L2, para una mejor definición de los retardos ionosféricos.

La velocidad de adquisición de datos de los receptores debe ser de más de 1Hz para lograr una mayor definición de las medidas, lo cual generará una gran cantidad de datos.

Es preferible que el emplazamiento para el montaje de las antenas GPS esté libre de obstáculos desde 5 grados de elevación.

2- Recolectar y almacenar los datos de los receptores

Se debería recolectar y almacenar los datos de las estaciones en forma periódica.

Los datos pueden ser recolectados mediante un dispositivo de almacenamiento externo o a través de una red que baje la información a un servidor de almacenamiento.

3- Identificar la ocurrencia de eventos ionosféricos severos

Se debe utilizar un soporte lógico para identificar, dentro de la cantidad de datos recolectados, la ocurrencia de eventos ionosféricos significativos.

4- Calcular las velocidades de los frentes de onda y de las gradientes

Se debe utilizar un soporte lógico para calcular la velocidad de los frentes de onda y las gradientes referentes a los datos con eventos ionosféricos significativos.

5- Comparación con el modelo de amenaza

Finalmente, los puntos calculados serán ingresados en el modelo de amenaza, permitiendo una evaluación de la aplicabilidad del modelo.

Es importante notar que la convalidación del modelo de amenaza de Stanford representa un enorme esfuerzo que requiere un gran presupuesto para cubrir los gastos de equipo, soporte lógico e investigación, y también requiere del apoyo de instituciones capaces de llevar a cabo este tipo de trabajo.

Asimismo, este tipo de análisis en una zona con un peor comportamiento ionosférico resulta de gran utilidad para zonas con mejores condiciones ionosféricas.

3.5.3 Instrucción del personal

La transición al GBAS representa un cambio significativo para la aviación, por lo que requiere nuevos enfoques en cuanto a la reglamentación, provisión de servicios y operación de las aeronaves, y la instrucción del personal es clave para el éxito de la implementación.

La instrucción debe incluir a:

- ✓ Los reguladores – responsables por la actualización de los reglamentos, de manera que incluyan las operaciones GBAS;
- ✓ Los diseñadores de procedimientos – responsables por el diseño de nuevos procedimientos GBAS;
- ✓ Los servicios de tránsito aéreo – responsables por el control del tránsito aéreo;

- ✓ Los servicios de información aeronáutica – responsables por los NOTAM y las bases de datos;
- ✓ Los explotadores de aeródromo – responsables por la operación de la nueva infraestructura GBAS;
- ✓ Los pilotos;
- ✓ Las normas de aeronavegabilidad – responsables por la aprobación de la aviónica y su instalación;
- ✓ El personal de mantenimiento de las NAVAID – responsable por el mantenimiento de la estación GBAS.

3.5.4 Adquisición e instalación de la estación terrestre GBAS

Esta fase comprende varias actividades, entre ellas:

- ✓ La identificación de los fabricantes del GBAS;
- ✓ La obtención de información acerca de los fabricantes;
- ✓ La definición de los requisitos técnicos y logísticos para la adquisición;
- ✓ La obtención de propuestas de los fabricantes;
- ✓ La selección de la mejor propuesta y firma del contrato;
- ✓ La instalación y configuración de la estación;
- ✓ Pruebas en tierra y en vuelo;
- ✓ La puesta en servicio.

3.5.5 Certificación y aprobaciones operacionales

Un tema importante durante la implementación del GBAS es la certificación y las aprobaciones operacionales, las cuales dependen de las regulaciones del país.

Los pasos comunes en la certificación son: la aprobación del diseño del sistema, la aprobación de las instalaciones y la aprobación operacional.

La aprobación del diseño del sistema (SDA) se refiere a la certificación del sistema como producto. Cada Estado puede tener un procedimiento para llevar a cabo toda la SDA, o convalidar la SDA realizada por otro país.

La aprobación de las instalaciones se refiere a la certificación de la instalación, con el cumplimiento de todos los requisitos del producto instalado en un determinado emplazamiento y condición.

La aprobación operacional se refiere a su debido funcionamiento, e involucra la existencia de reglamentos, instrucción del personal y todo proceso operacional definido y documentado.

Implementación efectiva

Luego de las fases de instrucción del personal, actualización de los reglamentos, instalación de la estación terrestre y certificación, la Autoridad Aeronáutica debe hacer efectivo el uso del sistema GBAS.

Durante la actualización de los reglamentos, es importante definir la infraestructura de respaldo y los procedimientos alternos en caso de falla del sistema.

4 Lista de siglas

Las siguientes siglas aparecen en el texto de esta guía:

ABAS	- Sistema de aumentación basado en la aeronave
APV	- Aproximación con guía vertical
C/A	- Adquisición común
CSA	- Canal de exactitud normal
EGNOS	- Servicio europeo de complemento geoestacionario de navegación
FAA	- Administración Federal de Aviación
FAS	- Tramo de aproximación final
FDE	- Detección y exclusión de fallas
FDMA	- Acceso múltiple por división de frecuencia
GAGAN	- Sistema de navegación aumentada por GPS y órbita terrestre geoestacionaria
GBAS	- Sistema de aumentación basado en tierra
GEO	- Órbita terrestre geoestacionaria
GLONASS	- Sistema mundial de navegación por satélite
GNSS	- Sistema mundial de navegación por satélite
GNSSP	- Grupo de expertos sobre el sistema mundial de navegación por satélite
GPS	- Sistema mundial de determinación de la posición
GRAS	- Sistema regional de aumentación basado en tierra
HPL	- Nivel de protección horizontal
ICD	- Documento de control de interfaz
IFR	- Reglas de vuelo por instrumentos
IGWG	- Grupo de trabajo internacional del GBAS
ILS	- Sistema de aterrizaje por instrumentos
LAL	- Límite de alerta lateral
MLS	- Sistema de aterrizaje por microondas
MMR	- Receptor multimodo
MSAS	- Sistema de aumentación basado en satélites MTSAT
MTSAT	- Satélite de transporte multifuncional
NAVAID	- Ayuda para la navegación
NPA	- Aproximación de no precisión
NSP	- Grupo de expertos sobre sistemas de navegación
OACI	- Organización de Aviación Civil Internacional
PPS	- Sistema de posicionamiento preciso
RAIM	- Vigilancia autónoma de la integridad en el receptor
RF	- Radiofrecuencia
RNAV	- Navegación de área
RPDS	- Selector de datos de trayectoria de referencia
RSDS	- Selector de datos de la estación de referencia
SARP	- Normas y métodos recomendados
SBAS	- Sistema de aumentación basado en satélites
SDCM	- Sistema de corrección diferencial y de monitoreo
SPS	- Servicio normalizado de determinación de la posición
TAP	- Trayectoria de aproximación terminal
TDMA	- Acceso múltiple por división en el tiempo
TSO	- <i>Technical Standard Order</i> /Orden sobre normas técnicas

UTC	- Tiempo universal coordinado
VAL	- Límite de alerta vertical
VDB	- Radiodifusión de datos VHF
VFR	- Reglas de vuelo visual
VHF	- Muy alta frecuencia
VOR	- Radiofaro omnidireccional VHF
VPL	- Nivel de protección vertical
WAAS	- Sistema de aumentación de área amplia

5 Lista de referencias en el documento

Figure 1 – GRAS architecture.....	11
Figure 2 – SBAS architecture	12
Figure 3 – GBAS architecture.....	13
Figure 4 – Minimum GBAS coverage (Annex 10, vol. 1, fig. D-4)	16
Figure 5 – Solar Activity.....	23
Figure 6 – Ionospheric regions.....	23
Figure 7 – GBAS stations	24
Figure 8 – GLS approach chart.....	29
Table 1 – Signal-in-space performance requirements (Annex 10, vol. 1, table 3.7.2.4-1)	5
Table 2 – GPS SPS Position Accuracy (Annex 10, vol. 1, item 3.7.3.1.1.1).....	7
Table 3 – GLONASS CSA Position Accuracy (Annex 10, vol. 1 item 3.7.3.2.1.1).....	8
Table 4 – GBAS VHF data broadcast messages (Annex 10, vol. 1, Table B-63)	17
Table 5 – Type 1 pseudo-range corrections message (Annex 10, vol. 1, table B-70)	17
Table 6 – Type 2 GBAS-related data message (Annex 10, vol. 1, Table B-71).....	18
Table 7 – Final Approach Segment (FAS) Data block (Annex 10, v. 1, Table B-66).....	19

6 Lista de documentos de referencia

Todos los documentos incluidos en esta sección brindan información acerca del GBAS y contribuyen a la implementación del concepto.

- Anexo 10, vol.1, del Convenio sobre Aviación Civil Internacional de la OACI;
- Anexo 14 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional de la OACI;
- Doc 9849 de la OACI – Manual GNSS;
- Manual del NSP de la OACI sobre los efectos ionosféricos en las operaciones aeronáuticas GNSS – Diciembre/2006;
- *FAA Non-Fed Specification FAA-E-AJW44-2937A - CATEGORY I LOCAL AREA AUGMENTATION SYSTEM GROUND FACILITY*;
- Department of Defense. (2000). *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces (ICDGPS-200C with IRN-200C-004, 12 April 2000)*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office;
- RTCA, Incorporated. (2001). *GNSS based precision approach local area augmentation system (LAAS) signal-in-space interface control document (RTCA/DO-246C)*. Washington, DC: RTCA, Incorporated.
- RTCA, Incorporated. (2001). *Minimum Aviation System Performance Standards for the local area augmentation system (LAAS) (RTCA/DO-245A)*. Washington, DC: RTCA, Incorporated.
- RTCA, Incorporated. (2001). *Minimum operational performance standards for global positioning system/local area augmentation system airborne equipment (RTCA/DO-253A)*. Washington, DC: RTCA, Incorporated.
- RTCA, Incorporated. (2002). *Guidelines for Communication Navigation Surveillance, and Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems Software Integrity Assurance (RTCA/DO-278)*. Washington, DC: RTCA, Incorporated.
- TSO C162 - *Ground Based Augmentation System Very High Frequency Data Broadcast Equipment*.
- TSO C161 - *Ground Based Augmentation System Positioning and Navigation Equipment*.
- ED-88 - *MOPS for Multi-Mode Airborne Receiver (MMR) including ILS, MLS and GPS used for Supplemental Means of Navigation*, agosto 97.
- ED-95 - *MASPS for a Global Navigation Satellite System Ground Based Augmentation System to Support Cat 1 Operations*, octubre 99.
- ED-114 - *MOPS for a Ground Based Augmentation System (GBAS) ground facility to support CAT I approach and landing*, setiembre 03.
- ED-144 - *System / Ground Based Augmentation System to Support Precision Approach Operations*, octubre 2007.