

Estudio sobre la implantación del sistema EGNOS en operaciones aeronáuticas

Denise Malinalli Suzarte Vásquez

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación (Plan 2017)
Tecnologías de Radiocomunicación

José Antonio López Salcedo
Germán Cobo Rodríguez

Junio 2020



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Estudio sobre la implantación del sistema EGNOS en operaciones aeronáuticas
Nombre del autor:	Denise Malinalli Suzarte Vásquez
Nombre del consultor/a:	José Antonio López Salcedo
Nombre del PRA:	Germán Cobo Rodríguez
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2020
Titulación:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Tecnologías de Radiocomunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	EGNOS, LPV, EBCAST, cloud, 5G

Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): *Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.*

La evolución del tráfico aéreo en los últimos años ha experimentado un continuo incremento, lo que plantea la necesidad de evolucionar su gestión desde un modelo basado en costosas infraestructuras terrestres hacia sistemas avanzados que permitan mayor flexibilidad, basados en tecnología satelital.

En este escenario, el sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), sistema de aumentación basado en satélite, emplea la señal civil de GPS en la frecuencia L1 para proporcionar correcciones e información de integridad y mejorar así el servicio en la región europea.

En concreto, el servicio SoL (*Safety of Life*) de EGNOS se ha diseñado específicamente para cumplir con los estrictos requisitos de la aviación civil, dando soporte a las aeronaves en diferentes fases de vuelo.

La finalidad de este Trabajo es el estudio de las prestaciones que ofrece el sistema en las operaciones aeronáuticas, para las que habilita la implantación de operaciones de aproximación hasta mínimos LPV basados en su uso.

Se analizan las principales ventajas, limitaciones y los factores que intervienen en esta implantación, empleando la herramienta EBCAST como soporte para cuantificar económicamente su viabilidad.

En el contexto del uso de las nuevas tecnologías, como el *cloud computing* o las redes 5G, se estudia el potencial que pueden aportar y se observan los resultados de casos que aplican la arquitectura basada en *cloud*, con datos de EDAS (*EGNOS Data Access Service*), que pone los datos del sistema a disposición de los usuarios a través de Internet.

Abstract (in English, 250 words or less):

The evolution of air traffic in recent years has steadily increased, and it raises the need to evolve air traffic management from a model based on costly terrestrial infrastructures to advanced systems that allow more flexibility, based on satellite technology.

In this scenario, the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), a satellite-based augmentation system, uses the GPS civilian signal at the L1 frequency to provide corrections and integrity information for improving positioning in the European region.

The EGNOS Safety of Life (SoL) service has been specifically designed to meet the stringent requirements applicable to civil aviation, supporting aircrafts for all phases of flight.

The purpose of this document is to study the performance offered by the system in aeronautical operations, where it enables the implementation of EGNOS based approach procedures down to LPV minima.

It analyses the main benefits, limitations and factors involved in its implementation, using EBCAST assessment tool regarding the introduction of LPV operations.

The use of new technologies, such as cloud computing or 5G networks, and their potential contribution are studied and results are presented about cloud-based architecture cases, using the EGNOS Data Access Service (EDAS), which makes EGNOS data accessible to users over the Internet.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.2 Objetivos del Trabajo.....	1
1.3 Enfoque y método seguido.....	2
1.4 Planificación del Trabajo	3
1.5 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria	4
2. Análisis funcional del sistema EGNOS.....	6
2.1 Descripción del sistema y servicios asociados.....	6
2.2 Arquitectura del sistema.....	9
2.3 Subsistemas de procesamiento de señal.....	13
2.4 Aumentación de la señal GNSS	16
2.5 Generación y características de la señal SIS	23
2.6 Estructura del mensaje EGNOS	28
2.7 Evolución del sistema EGNOS.....	33
3. Estudio sobre la aplicación de EGNOS en operaciones aeronáuticas	36
3.1 Caso de uso: procedimientos de aproximación RNP APCH (mínimos LPV)	36
3.2 Estado actual de implantación de procedimientos RNP APCH (mínimos LPV)	43
3.3 Factores que determinan la implantación de procedimientos RNP APCH (mínimos LPV).....	48
3.4 Ventajas e inconvenientes del uso de EGNOS en operaciones aeronáuticas.....	57
3.5 Facilitadores para implantación de EGNOS en operaciones aeronáuticas	60
4. Estudio de viabilidad sobre el uso de EGNOS en el <i>cloud</i>	63
4.1 Receptores GNSS y compatibilidad con EGNOS.....	63
4.2 Servicio de streaming EDAS (EGNOS Data Access Service)	66
4.3 Despliegue de redes de comunicación 5G	70
4.4 Empleo de EGNOS basado en <i>cloud</i>	75
5. Conclusiones.....	83
6. Glosario	86
7. Bibliografía	90
8. Anexos	94
Anexo A. Errores de posición horizontal y vertical (HPE/VPE)	95
Anexo B. Prestaciones del sistema EGNOS para aproximaciones con guiado vertical.....	98
Anexo C. Datos de entrada y resultados obtenidos con EBCAST Tool	102
Anexo D. Prestaciones del servicio EDAS	118

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de Gannt del TFM.....	4
Ilustración 2. Sistemas SBAS existentes y en desarrollo [Ref.7].....	7
Ilustración 3. Arquitectura de EGNOS [Ref.7]	9
Ilustración 4. Configuración del segmento espacial [Ref.13].....	10
Ilustración 5. Configuración del segmento terrestre [Ref.13].....	12
Ilustración 6. Segmentos funcionales del sistema [Ref.14]	12
Ilustración 7. Arquitectura de un canal RIMS [Ref.15].....	13
Ilustración 8. Arquitectura general de la CPF de EGNOS [Ref.18]	14
Ilustración 9. Principales fuentes de error de la señal GNSS [Ref.21]	17
Ilustración 10. Correcciones rápidas y lentas generadas por el sistema [Ref.19]	20
Ilustración 11. Límites relacionados con el concepto de integridad [Ref.20].....	22
Ilustración 12. Generación código C/A	24
Ilustración 13. Codificación SBAS. Opción con retardo programable [Ref.10].....	25
Ilustración 14. Codificación SBAS. Opción con estado inicial programable [Ref.10] ...	25
Ilustración 15. Codificación convolucional [Ref.10]	26
Ilustración 16. Formato del mensaje SBAS [Ref.10]	26
Ilustración 17. Máscara ionosférica con IGP's predefinidos [Ref.20]	31
Ilustración 18. Especificaciones de navegación PBN [Ref.26]	36
Ilustración 19. Mínimos de operación de la especificación RNP APCH [Ref.27]	37
Ilustración 20. Mínimos de operación de la especificación RNP APCH [Ref.28]	38
Ilustración 21. Actores implicados en la provisión del servicio EGNOS SoL [Ref.26] ..	39
Ilustración 22. Estado de implantación de procedimientos RNP APCH en Europa [Ref.32]	44
Ilustración 23. Procedimientos LPV implantados/previstos en Europa [Ref.32].....	45
Ilustración 24. Estado de implantación de procedimientos RNP APCH en España [Ref.32]	46
Ilustración 25. Procedimientos LPV implantados/previstos en España [Ref.32]	47
Ilustración 26. Mapa de proceso para la implantación de procedimientos PBN [Ref.27]	50
Ilustración 27. Datos de tráfico de aeropuertos españoles en 2019 [Ref.41]	55
Ilustración 28. Actores implicados en la implantación de LVP [Ref.26].....	60
Ilustración 29. Diagrama de bloques de un receptor GNSS [Ref.49]	63
Ilustración 30. Receptor convencional vs receptor software [Ref.48].....	66
Ilustración 31. Arquitectura de alto nivel de EDAS [Ref.51]	67
Ilustración 32. Arquitectura del servicio EDAS [Ref.51].....	68
Ilustración 33. Servicios básicos de la 5G [Ref.61]	71
Ilustración 34. Evolución de las redes hasta 5G y servicios asociados [Ref.62]	72
Ilustración 35. Bandas de frecuencia identificadas para 5G en Europa y posibles casos de uso [Ref.60]	72
Ilustración 36. Arquitectura de un receptor GNSS basado en <i>cloud</i> [Ref.48].....	76
Ilustración 37. Ejemplo arquitectura EGNOS basada en <i>cloud</i> [Ref.70]	80
Ilustración 38. Posiciones estimadas con el método de los mínimos cuadrados mediante <i>cloud computing</i> [Ref.70]	81
Ilustración 39. Valores de VPE y HPE para la RIMS SDCA y GEO123 para el 31/03/2020.....	95
Ilustración 40. Valores de VPE y HPE para la RIMS SDCA y GEO136 para el 31/03/2020.....	95
Ilustración 41. Valores de VPE y HPE para la RIMS PDMA y GEO123 para el 31/03/2020.....	96

Ilustración 42. Valores de VPE y HPE para la RIMS PDMA y GEO136 para el 31/03/2020.....	96
Ilustración 43. Valores de VPE y HPE para la RIMS MLGA y GEO123 para el 31/03/2020.....	97
Ilustración 44. Valores de VPE y HPE para la RIMS MLGA y GEO136 para el 31/03/2020.....	97
Ilustración 45. Valores de disponibilidad APV-I para el primer trimestre de 2020	98
Ilustración 46. Valores de disponibilidad LPV-200 para el primer trimestre de 2020 ...	99
Ilustración 47. Valores de continuidad APV-I para el primer trimestre de 2020	100
Ilustración 48. Valores de continuidad LPV-200 para el primer trimestre de 2020.....	101

Lista de Tablas

Tabla 1. Planificación del TFM	3
Tabla 2. Satélites geoestacionarios del segmento espacial [Ref.7]	10
Tabla 3. Formato del mensaje SBAS [Ref.7].....	28
Tabla 4.. Formato del mensaje SBAS [Ref.10].....	29
Tabla 5. Niveles de servicio EGNOS SoL frente a especificaciones de navegación [Ref.7].....	41
Tabla 6. Prestaciones requeridas establecidas por OACI [Ref.7]	42
Tabla 7. Prestaciones EGNOS SoL [Ref.7]	43
Tabla 8. Procedimientos LPV implantados en Europa [Ref.32].....	45
Tabla 9. Procedimientos LPV implantados/previstos en Europa [Ref.32]	45
Tabla 10. Procedimientos LPV implantados/previstos en España [Ref.32].....	48
Tabla 11. Prestaciones de EDAS en enero de 2020 [Ref.54]	118
Tabla 12. Prestaciones de EDAS en febrero de 2020 [Ref.54]	119
Tabla 13. Prestaciones de EDAS en marzo de 2020 [Ref.54].....	119

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

El presente trabajo pretende llevar a cabo un estudio sobre la implantación del sistema EGNOS en el ámbito de la aviación y las operaciones aeronáuticas.

El sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*) es el sistema europeo de aumentación basado en satélite (SBAS, *Satellite Based Augmentation System*), que se utiliza para mejorar las prestaciones de los sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*), como GPS/Glonass y en un futuro Galileo. El sistema EGNOS fue desarrollado para proporcionar, entre otros, servicios críticos de navegación (*Safety of Life, SoL*) para usuarios del transporte aéreo, marítimo y terrestre.

EGNOS utiliza medidas GNSS tomadas por estaciones de referencia distribuidas por Europa y Norte de África. Estas medidas se envían a una central de computación donde se calculan las correcciones diferenciales y los mensajes de integridad que deben aplicar los receptores GNSS para mejorar su precisión. Estos mensajes se difunden dentro del área de cobertura del sistema mediante el uso de satélites geoestacionarios que realizan la función de aumentación de las medidas GNSS originales.

Sobre la base del sistema EGNOS se abordará un estudio de su aplicación en las operaciones aeronáuticas, así como la viabilidad de su empleo a través de computación en la nube (*cloud*).

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos que se plantea conseguir con el desarrollo del trabajo son:

Objetivo #1. Análisis funcional del sistema EGNOS

Se busca analizar el funcionamiento del sistema para comprender su potencial y su aplicación práctica. Para ello se partirá de una descripción del funcionamiento del sistema EGNOS indicando la arquitectura del mismo, los elementos que lo componen y la estructura del mensaje que se transmite a los usuarios. En relación al mensaje, además de una descripción de los datos que contiene, se describirán a alto nivel los algoritmos a implementar para calcular las correcciones sobre la señal GNSS y así mejorar su precisión/integridad.

Objetivo #2. Estudio sobre la aplicación de EGNOS en operaciones aeronáuticas

Uno de los principales casos de uso del sistema EGNOS es la ayuda a las operaciones aeronáuticas, como por ejemplo actuar de facilitador para procedimientos LPV (*Localizer Performance with Vertical guidance*). Aunque estos procedimientos basados en GNSS+EGNOS están ya operacionales en la mayoría de los aeropuertos europeos según puede comprobarse en [Ref.1], en España la situación es muy distinta con apenas media docena de aeropuertos de tamaño medio con dichos procedimientos implementados. En este segundo objetivo se pretende llevar a cabo un estudio de viabilidad del uso de EGNOS para operaciones LPV incidiendo en sus ventajas, inconvenientes y requisitos necesarios para su implementación. Para ello se empleará la herramienta de soporte EBCAST disponible en [Ref.2].

Objetivo #3. Estudio de viabilidad sobre el uso de EGNOS en el cloud

Uno de los inconvenientes del sistema EGNOS es que el receptor de usuario ha de estar preparado para procesar el mensaje de aumentación y a partir de los datos extraídos, calcular las correcciones necesarias sobre la señal GNSS. No todos los receptores de GNSS existentes son compatibles con EGNOS y ello dificulta la penetración del sistema, sobre todo, en aplicaciones donde los receptores de usuario tienen un alto coste y es difícil reemplazarlos a corto plazo. Algunos autores han planteado la opción de implementar las correcciones EGNOS en un servidor externo al cual el receptor GNSS del usuario se conectaría vía un enlace de comunicaciones [Ref.3]. Vendría a ser una implementación de EGNOS en el cloud donde el receptor de usuario enviaría las medidas crudas de GNSS, el cloud obtendría los datos de EGNOS a partir de un servicio de streaming como EDAS [Ref.4] y devolvería al usuario la posición ya corregida. Se pretende evaluar la viabilidad de este concepto en aplicaciones aeronáuticas teniendo en cuenta el futuro despliegue de redes de comunicación 5G de “ultra-reliable low-latency” [Ref.5].

1.3 Enfoque y método seguido

Con objeto de dar cumplimiento a los objetivos identificados anteriormente, el enfoque seguido para desarrollar la estructura del trabajo ha sido en base a los siguientes bloques y contenidos:

Bloque 1: Análisis funcional del sistema EGNOS

- Descripción del sistema y servicios asociados
- Arquitectura del sistema
- Estructura del mensaje EGNOS
- Correcciones sobre la señal GNSS

Bloque 2: Estudio sobre la aplicación de EGNOS en operaciones aeronáuticas

- Caso de uso: procedimientos de aproximación RNP APCH (mínimos LPV)

- Estado actual de implantación de procedimientos RNP APCH (mínimos LPV)
- Ventajas e inconvenientes sobre el uso de EGNOS en operaciones aeronáuticas
- Facilitadores para implantación de EGNOS en operaciones aeronáuticas

Bloque 3: Estudio de viabilidad sobre el uso de EGNOS en el *cloud*

- Receptores GNSS y compatibilidad con EGNOS
- Servicio de *streaming* EDAS
- Despliegue de redes de comunicación 5G
- Análisis uso EGNOS a través del *cloud*

1.4 Planificación del Trabajo

Se incluye a continuación la planificación realizada, considerando los hitos de entrega de las diferentes PEC solicitados durante el periodo de duración del trabajo:

Hitos	Tareas	Fecha inicio	Fecha fin
	Definición del trabajo y sus objetivos	19/02/2020	25/02/2020
	Definición estructura del trabajo	26/02/2020	29/02/2020
	Elaboración planificación del trabajo	01/03/2020	03/03/2020
	Revisión planificación del trabajo	03/03/2020	09/03/2020
PEC1	Entrega planificación del trabajo	09/03/2020	09/03/2020
	Desarrollo contenido inicial Bloque 1	09/03/2020	23/03/2020
	Desarrollo contenido inicial Bloque 2	23/03/2020	06/04/2020
PEC2	Entrega informe de seguimiento TFM	06/04/2020	06/04/2020
	Desarrollo contenido inicial Bloque 3	06/04/2020	20/04/2020
	Revisión contenidos Bloque 1	20/04/2020	27/04/2020
	Revisión contenidos Bloque 2	27/04/2020	04/05/2020
	Revisión contenidos Bloque 3	04/05/2020	11/05/2020
PEC3	Entrega borrador inicial Memoria	11/05/2020	11/05/2020
	Revisión y redacción final Bloque 1	11/05/2020	21/05/2020
	Revisión y redacción final Bloque 2	21/05/2020	31/05/2020
	Revisión y redacción final Bloque 3	01/06/2020	11/06/2020
	Elaboración presentación del trabajo	11/06/2020	15/06/2020
PEC4	Entrega Memoria final	15/06/2020	15/06/2020
Debate virtual	Preparación respuestas a cuestiones sobre el TFM	23/06/2020	26/06/2020

Tabla 1. Planificación del TFM

El diagrama de Gantt correspondiente a la planificación anterior puede verse en la ilustración inferior.

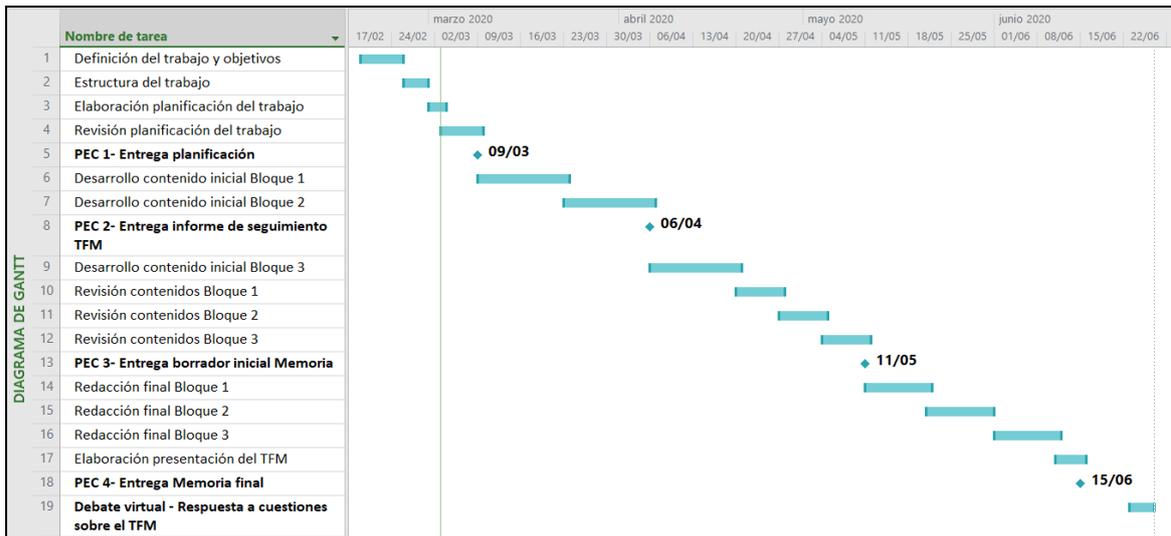


Ilustración 1. Diagrama de Gantt del TFM

1.5 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

El contenido del resto de capítulos que conforman esta memoria se ha estructurado en torno a los bloques definidos en el apartado anterior.

En el Capítulo 2 se realiza un análisis del sistema EGNOS, se estudia la arquitectura del sistema y se presentan los servicios que ofrece. Se describen las técnicas de procesado de señal que emplea y cómo lleva a cabo las funciones de aumentación y mejora de la señal GNSS, detallándose la estructura de los mensajes que emplea. Por último, este capítulo contiene una visión de la evolución futura del sistema.

En el Capítulo 3 se estudia la aplicación del sistema en las operaciones aeronáuticas. Para ello, se introduce el concepto de navegación basada en prestaciones (PBN) y los tipos de operaciones que permiten realizar. En concreto, se analiza el estado actual de implantación de procedimientos con guiado vertical (LPV) basado en EGNOS tanto a nivel europeo como nacional y los factores que determinan la implantación de estos procedimientos. También se introducen las principales ventajas e inconvenientes asociados al empleo de EGNOS en el ámbito de la navegación aérea. Por último, se analizan algunos facilitadores para la implantación de los procedimientos basados en EGNOS.

En el Capítulo 4 se estudia la viabilidad sobre el uso de EGNOS mediante la tecnología *cloud*. Para ello, en primer lugar, se estudian las características y tipos de receptores GNSS, así como la compatibilidad con EGNOS. Posteriormente, se describe otro de los servicios de EGNOS, EDAS, que pone los datos del sistema a disposición de los usuarios a través de un servicio de *streaming* a través de Internet. Por ello, se analiza también el estado de despliegue de las redes 5G y el potencial que pueden aportar para mejorar las prestaciones de las comunicaciones, especialmente en lo relativo a la latencia. Por último, se propone una arquitectura de uso del sistema basado en *cloud*, y se describen pruebas realizadas según esta arquitectura, los

principales resultados obtenidos y algunos aspectos que deberían resolverse de manera previa a su uso operacional.

Finalmente, se presentan las conclusiones alcanzadas como resultado del estudio realizado.

2. Análisis funcional del sistema EGNOS

En este primer bloque se realiza una introducción al sistema EGNOS y los diferentes servicios que ofrece, describiendo su arquitectura, las técnicas y correcciones que aplica sobre la señal GNSS y la estructura que presentan los mensajes que transmite. Se ha desarrollado principalmente en base a la información disponible en [Ref.6], [Ref.7], [Ref.8].

2.1 Descripción del sistema y servicios asociados

Los sistemas de navegación por satélite tienen como finalidad proporcionar información de posicionamiento y de tiempo en áreas geográficas extensas, típicamente con cobertura continental o global, con gran precisión. Sin embargo, debido a factores tanto internos como externos a estos sistemas, debido a condiciones ambientales, se pueden producir errores adicionales a los errores de navegación observados típicamente. Para la mayor parte de los usuarios estos errores pueden pasar inadvertidos o tendrán un efecto limitado en sus aplicaciones. No obstante, para servicios críticos desde el punto de vista de la seguridad, como es el caso de la navegación aérea, estos errores pueden llegar a tener un impacto directo en la seguridad de las operaciones. Por ello, existe una necesidad fundamental de corregir tales errores, o advertir a tiempo al usuario cuando estos errores ocurren y no pueden ser corregidos. Por esta razón, se han diseñado sistemas de aumentación que mejoran las prestaciones de las constelaciones satelitales globales existentes.

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) es el sistema europeo de aumentación basado en satélite (SBAS, *Satellite Based Augmentation System*). Los sistemas SBAS tienen la finalidad de aumentar las constelaciones de los sistemas de navegación mediante la difusión de señales adicionales a través de satélites geostacionarios (GEO). El esquema básico consiste en usar un conjunto de estaciones de monitorización que se encuentran en posiciones bien conocidas, para recibir las señales de navegación de las constelaciones GNSS que serán procesadas con el fin de obtener una estimación de estos errores (errores ionosféricos, de posicionamiento/reloj satelital, etc). Una vez que estos errores se han calculado, se transmiten en forma de correcciones diferenciales a través de los satélites GEO. En la actualidad, EGNOS aumenta la señal GPS y aumentará también la señal Galileo en su versión 3, prevista para 2025, lo que proporcionará a los usuarios una solución más robusta y rendimientos mejorados.

Las correcciones que transmite EGNOS contribuyen a mitigar fuentes de error relacionadas con el reloj y la posición de los satélites y los efectos ionosféricos. Otras fuentes de error, como la contribución del efecto troposférico, del multicamino y de los receptores de usuario, son efectos locales que no pueden ser corregidos por un sistema de aumentación de área extensa. Junto con los mensajes de corrección

generados por el sistema EGNOS, se transmiten, además, datos de integridad sobre los satélites que se encuentran en el campo de visión de la red de estaciones de monitorización.

Como se ha visto, el sistema EGNOS presta un servicio SBAS, multimodal e interregional, capaz de dar soporte a una amplia variedad de usuarios de diferentes ámbitos, desde el transporte aéreo hasta el marítimo, ferroviario, terrestre o el sector agrícola. En la actualidad existen diferentes sistemas SBAS diseñados conforme al mismo estándar, que se encuentran en servicio en países como EEUU (WAAS, *Wide Area Augmentation System*), Japón (MSAS, *MTSAT Satellite based Augmentation System*) y la India (GAGAN, *GPS Aided GEO Augmented Navigation*), y sistemas análogos en otras regiones, en fase de despliegue, como en Rusia (SDCM, *System of Differential Correction and Monitoring*), o en fase de investigación, como en Corea del Sur (KASS, *Korea Augmentation Satellite System*). En la Ilustración 2 se muestran los sistemas SBAS existentes y en desarrollo.

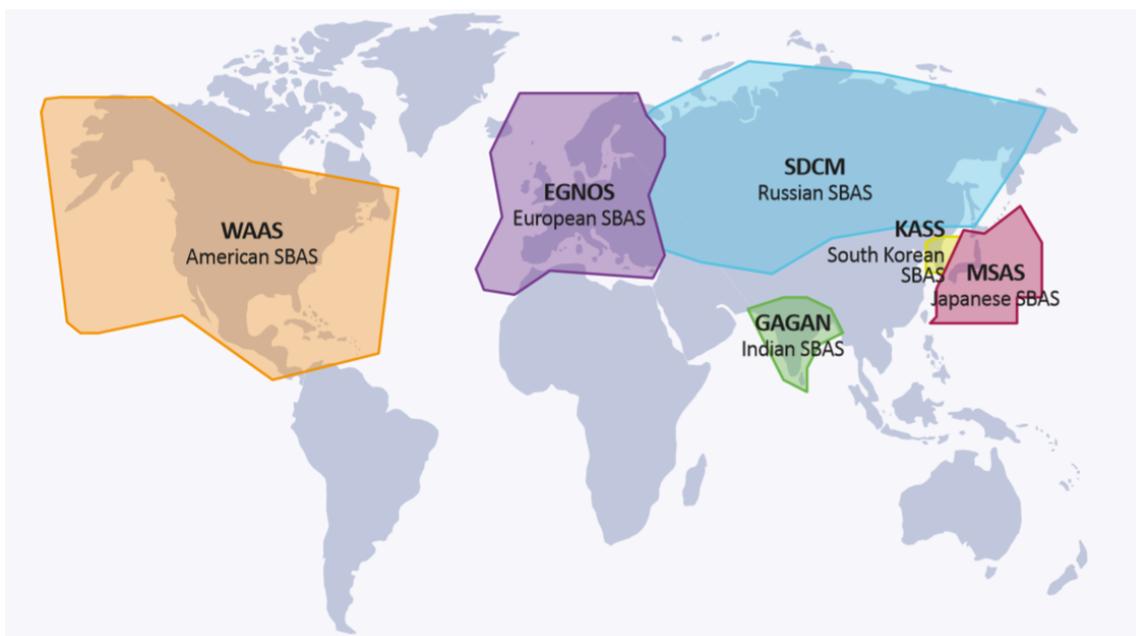


Ilustración 2. Sistemas SBAS existentes y en desarrollo [Ref.7]

2.1.1 Servicios EGNOS

El sistema EGNOS proporciona correcciones e información de integridad a las señales GPS en un área que cubre Europa y que es totalmente interoperable con otros sistemas SBAS existentes.

El sistema SBAS emplea satélites geoestacionarios (GEO) para transmitir información de integridad y correcciones de los datos GNSS. En el caso de EGNOS se proporcionan tres servicios diferentes:

- El Servicio Abierto (*Open Service, OS*), disponible libremente para cualquier usuario.

- El Servicio crítico de navegación (Safety of Life, SoL), que ofrece un nivel más exigente en cuanto al rendimiento de la señal proporcionada, SIS (Signal in Space), orientado a aplicaciones de transporte críticas desde el punto de vista de la seguridad.
- El Servicio de acceso de datos EGNOS (*EGNOS Data Access Service, EDAS*) para usuarios que requieren rendimientos mejorados para uso comercial y profesional.

2.1.2 Servicio *Safety of Life (SoL)*

El principal objetivo de este servicio es dar soporte a la aviación civil, concretamente a las operaciones de aproximación hasta mínimos LPV (prestaciones de localizador con guiado vertical). Aunque este servicio se ha desarrollado con los requisitos de la aviación civil, el servicio SoL podrá aplicarse en un futuro a una gran variedad de campos tales como el transporte marítimo, ferroviario o terrestre.

Para proporcionar el servicio SoL, el sistema EGNOS se ha diseñado para que la señal EGNOS cumpla con los requisitos establecidos por la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) y la RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*) para los sistemas SBAS. Los requisitos de OACI para los sistemas SBAS se especifican en los SARPS (*Standards and Recommended Practices*) Anexo 10 Telecomunicaciones Aeronáuticas, Volumen I Radioayudas para la navegación [Ref.9] y los de la RTCA en el documento *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment DO-229D* [Ref.10].

El servicio SoL de EGNOS está disponible desde el 2 de marzo de 2011 y la definición del servicio viene establecida en el documento *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document* [Ref.7]. Desde su inicio, el servicio SoL declaró dos niveles de servicio diferentes (NPA y APV-I) y desde septiembre de 2015, un servicio adicional (LPV-200), que permiten llevar a cabo, cumpliendo los requisitos establecidos en [Ref.9], las siguientes operaciones basadas en SBAS:

- Operaciones de aproximación de no precisión (*NPA, Non-Precision Approach*) y otras operaciones basadas en la especificación de navegación basada en prestaciones (*PBN, Performance Based Navigation*) diferentes de la RNP APCH, es decir, no solo para la fase de aproximación sino también para otras fases de vuelo.
- Operaciones de aproximación con guiado vertical (*APV, Approach with Vertical guidance*) que soportan la especificación RNP APCH de PBN hasta mínimos LPV de 250 ft.
- Aproximaciones de precisión (*PA, Precision Approach*) de categoría I (*LPV-200*) con límite de alerta vertical (*VAL, Vertical Alert Limit*) de 35 m, que soportan la especificación RNP APCH de PBN hasta mínimos LPV de 200 ft.

2.2 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema se divide en cuatro segmentos funcionales: el segmento espacial, el segmento terrestre, el segmento de soporte y el segmento de usuario.

La arquitectura funcional de EGNOS se muestra en la Ilustración 3.

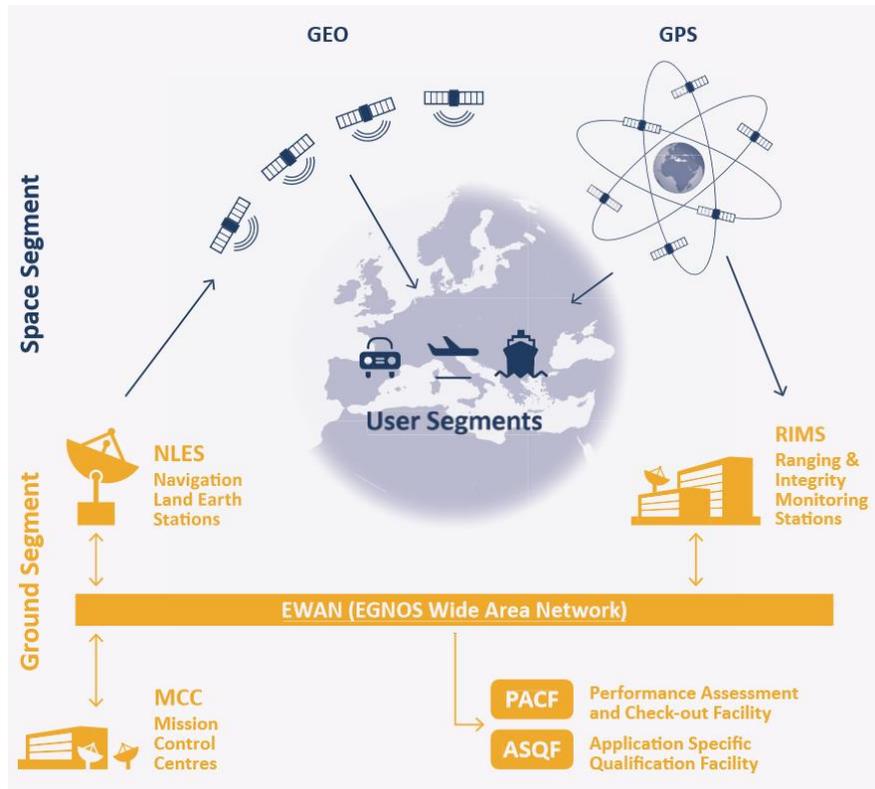


Ilustración 3. Arquitectura de EGNOS [Ref.7]

El **segmento espacial** de EGNOS está compuesto por al menos tres satélites geostacionarios (GEO) que transmiten las correcciones y la información de integridad de los satélites del sistema GPS en la banda L1 (centrada en la frecuencia 1575,42 MHz). La configuración de los satélites GEO operacionales no cambia con frecuencia, pero posibles actualizaciones son reportadas/informadas al usuario por el proveedor de servicios EGNOS (*ESSP, European Satellite Service Provider*).

La configuración del segmento espacial proporciona un alto nivel de redundancia en toda el área de cobertura en caso de fallo del enlace de alguno de los satélites GEO. Así, las operaciones EGNOS se llevan a cabo de forma que en cualquier punto y en cualquier instante, al menos dos satélites GEO transmiten señales operacionales, mientras que otros satélites transmiten señales de prueba. Esto asegura la capacidad de conmutación de un satélite a otro en caso de interrupción y garantiza un alto nivel de continuidad del servicio.

El segmento espacial de EGNOS se replanifica a lo largo del tiempo para realizar ajustes en los satélites, pero manteniendo un grado de redundancia similar. La localización de las órbitas puede variar, y se puede asignar diferentes códigos

pseudoaleatorios (PRN, *pseudo-random noise*) a los futuros GEOs, pero estos cambios se realizan de forma que son transparentes para el usuario final y sin comprometer en ningún momento las prestaciones del sistema.

Los satélites GEO que conforman el sistema espacial se listan en la Tabla 2.

GEO Name	PRN Number	Orbital Slot
ASTRA-5B	PRN 123	31.5 E
ASTRA SES-5	PRN 136	5 E
INMARSAT 4F2 EMEA	PRN 126	64 E

Tabla 2. Satélites geoestacionarios del segmento espacial [Ref.7]

En la configuración actual, los satélites PRN 136 (GEO-1) y PRN 123 (GEO-2) transmiten la señal EGNOS operacional, mientras que PRN 126 (INM4F2) se utiliza en modo test. En octubre de 2019 se completó el lanzamiento de un nuevo satélite GEO, PRN 121 (GEO-3), cuya finalidad es el desarrollo y la realización de pruebas para la versión 3 de EGNOS, que permitirá aumentar las señales GPS y Galileo en las bandas L1 y L5. La Ilustración 4 muestra la configuración del segmento espacial.



Ilustración 4. Configuración del segmento espacial [Ref.13]

El **segmento terrestre** está compuesto por una red de estaciones de monitorización de la señal GPS (*RIMS, Ranging Integrity Monitoring Stations*), dos centros de control de misión (*MCC, Mission Control Centres*), encargados de procesar los datos de las RIMS y generar los mensajes a transmitir por los satélites GEO, dos estaciones de transmisión de datos (*NLES, Navigation Land Earth Stations*) por cada satélite GEO (esto es, 6 NLES en total), que envían los mensajes generados por la MCC a los satélites de la constelación EGNOS (GEO). Adicionalmente, una red EGNOS de área extensa (*EWAN, EGNOS Wide Area Network*) provee las comunicaciones necesarias para todos los componentes del segmento terrestre.

Las estaciones RIMS tienen como función principal recoger mediciones de los satélites GPS y de los satélites GEO y transmitir estos datos en crudo cada segundo a la central de procesamiento (*CPF, Central Processing Facility*) existente en cada MCC. La red de estaciones RIMS comprende en la actualidad 40 estaciones localizadas en su mayoría en diversos puntos geográficos europeos.

La central de procesamiento CPF es un módulo de cálculo presente en cada MCC que emplea los datos recibidos de la red de estaciones RIMS para elaborar las

correcciones de la señal GPS y los errores residuales de estas correcciones. Así, sus principales funciones son:

- La elaboración de correcciones de la información de reloj de los satélites GPS visibles por la red de estaciones RIMS. Estas correcciones son válidas en toda el área en la que la señal EGNOS es recibida.
- La elaboración de correcciones de las efemérides de los satélites, es decir, de los datos orbitales de cada satélite necesarios para determinar su posición en cualquier punto e instante, para mejorar su exactitud. Estas correcciones también son válidas en el área de recepción de la señal EGNOS, si bien pueden sufrir alguna degradación fuera de la zona central del área de servicio EGNOS, debido a la distribución de la red de monitorización terrestre del sistema.
- La elaboración de modelos de error ionosférico para el área de servicio EGNOS que permitan compensar la perturbación ionosférica que sufre la señal de navegación.

Las correcciones anteriores se transmiten a los usuarios para mejorar la exactitud de la información de posicionamiento. Las CPF también realizan estimaciones del error residual que pueden esperar los usuarios una vez que aplican las correcciones enviadas por el sistema.

La CPF incluye además una gran cantidad de funciones de monitorización diseñadas para detectar cualquier anomalía en los sistemas GPS y EGNOS y advertir a los usuarios en un breve periodo tiempo (que debe ser inferior al tiempo de alerta establecido (*TTA, Time To Alert*) en caso de que el error supere un determinado valor umbral.

Los mensajes elaborados por la CPF se transmiten a las estaciones NLES. A efectos de garantizar la redundancia, existen dos NLES por cada satélite GEO que transmiten el mensaje EGNOS recibido de las CPF a los satélites GEO, para difundirlo a los usuarios y asegurar la sincronización con la señal GPS.

Las estaciones NLES se agrupan en pares, apuntando hacia el satélite GEO. Para cada GEO, una de las estaciones se encuentra activa mientras que la otra está en modo back-up.

Además, en cada centro de control MCC hay ubicada una instalación CCF (*Central Control Facility*) a través de la cual se controla el sistema EGNOS. Esta en operación permanentemente para garantizar monitorización y control continuo del servicio.

El **segmento de soporte** está compuesto por dos instalaciones terrestres destinadas a dar soporte a la planificación de operaciones y a la evaluación del rendimiento:

- PACF (Performance Assessment and Check Out Facility): proporciona soporte a la gestión de EGNOS, realiza análisis de prestaciones del sistema, resolución

de incidencias y procedimientos operacionales, mejoras en las especificaciones y validaciones, y coordinación técnica.

- ASQF (Application Specific Qualification Facility): proporciona herramientas de cualificación, validación y certificación de aplicaciones de EGNOS a las autoridades de certificación aeronáuticas y de aviación civil.

La Ilustración 5 muestra los componentes de los segmentos terrestre y de soporte del sistema EGNOS.

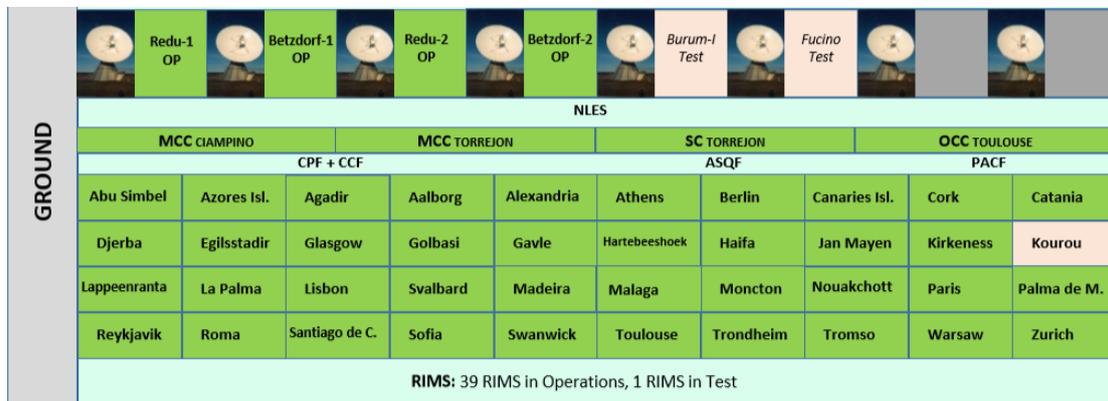


Ilustración 5. Configuración del segmento terrestre [Ref.13]

Por último, el **segmento de usuario** está formado por los receptores EGNOS de los usuarios, que proporcionan capacidad para obtener de forma precisa y con integridad información sobre su posicionamiento. Para poder recibir la señal, el usuario final debe estar equipado con un receptor adecuado, que sea compatible con EGNOS.

En la actualidad existen receptores compatibles con EGNOS para diferentes segmentos de mercado: agricultura, aviación, marítimo, ferroviario, cartografía/geodesia, transporte por carreteras y servicios basados en localización (LBAS).

La Ilustración 6 resume los segmentos descritos anteriormente.

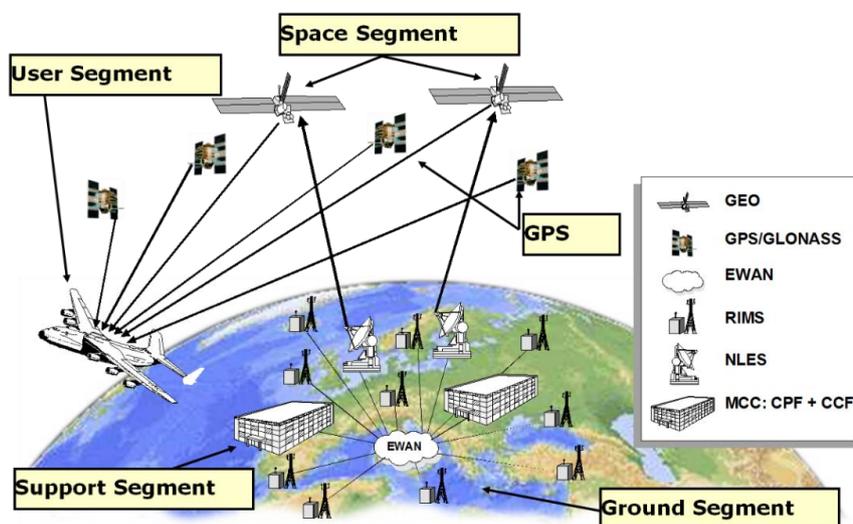


Ilustración 6. Segmentos funcionales del sistema [Ref.14]

2.3 Subsistemas de procesamiento de señal

La señal de entrada al sistema se procesa a lo largo de los diferentes subsistemas que componen EGNOS, según se describe a continuación.

En primer lugar, la estaciones RIMS son las encargadas de obtener los datos de entrada al sistema.

La arquitectura de las estaciones RIMS [Ref.15] está formada por 2 o 3 canales independientes, denominados A/B o A/B/C en función de si el canal C se encuentra instalado o no. Con el fin de evitar fallos comunes, los canales A y B están diversificados y el diseño se realiza, bajo las mismas especificaciones, mediante procesos independientes y por fabricantes diferentes. Cada uno de estos canales A y B constituyen cadenas de medidas independientes con su propia antena y receptor. En cuanto al canal C, este es independiente de los canales A y B, y su contribución tiene que ver con una función para determinar la integridad, denominada SFD (*Satellite Failure Detection*).

La Ilustración 7 muestra la arquitectura de un canal RIMS.

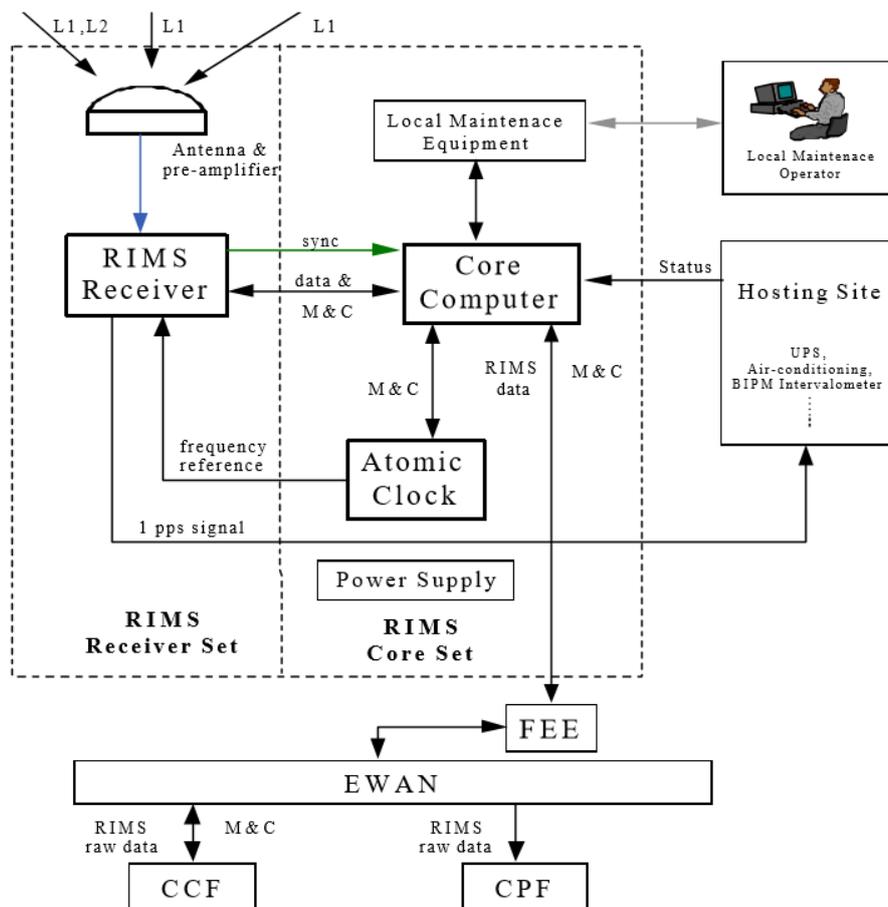


Ilustración 7. Arquitectura de un canal RIMS [Ref.15]

Las RIMS A y B se encargan de [Ref.16]:

- Realizar medidas de pseudorrangos (código y fase) de los satélites monitorizados, tanto de la señal GPS como de los satélites GEO
- Demodular y decodificar (decodificación Viterbi) de la señal en el espacio SIS
- Mitigar los efectos locales del multicamino y las interferencias aplicando un software interno
- Dar formato a los mensajes que transmiten hacia la CPF
- Una RIMS específica, situada en Paris, se encarga de medir el tiempo de offset entre el reloj con referencia UTC (Universal Time Coordinated) y el tiempo del sistema EGNOS (ENT)

La RIMS C emplea técnicas de procesado de señal para detectar anomalías en la señal GPS, y avisa al CPF en caso de detección de fallo en la señal satelital.

Los datos procedentes de los diferentes receptores localizados en las estaciones RIMS se procesan en la CPF, que es el verdadero cerebro del sistema y el subsistema que aplica técnicas de procesamiento a los datos críticos de forma más intensiva. La CPF consta de una unidad de procesado y dos unidades de comprobación en los que se deben completar sendos ciclos dentro de un periodo de tiempo que cumpla con los requisitos de EGNOS en relación con el tiempo de alarma. Estos ciclos se describen en [Ref.17].

La Ilustración 8 presenta la arquitectura general de la CPF de EGNOS.

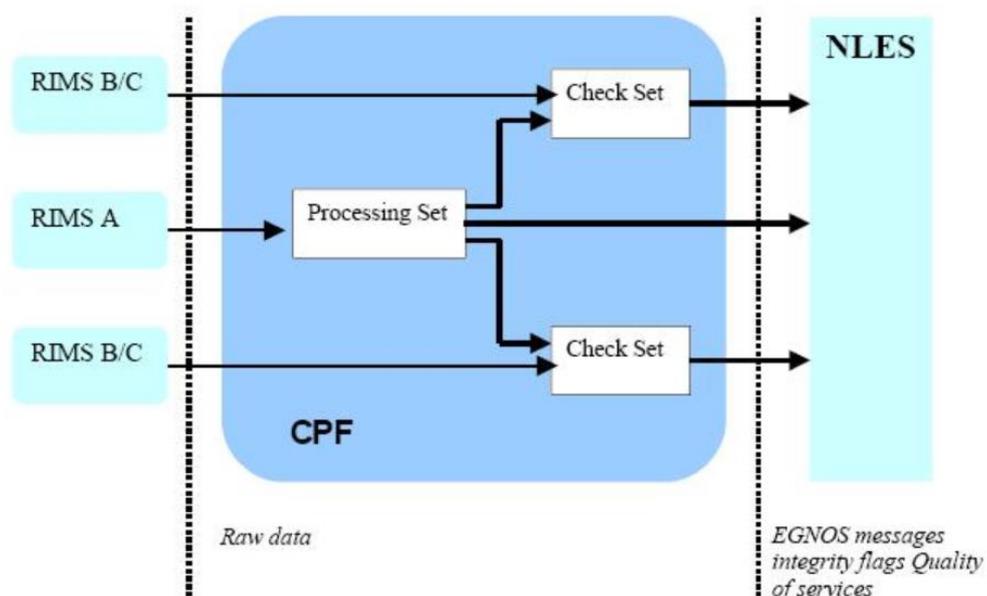


Ilustración 8. Arquitectura general de la CPF de EGNOS [Ref.18]

1. El ciclo de procesado recibe los datos obtenidos por parte de las RIMS A y la generación del mensaje de navegación EGNOS. Se procesan en tiempo real los

datos en crudo de todas las RIMS para generar las correcciones y los mensajes de integridad. Este proceso se lleva a cabo en cuatro pasos principales:

- Los datos de entrada de las RIMS A se preprocesan y validan para minimizar los errores sistemáticos, como los retardos ionosféricos y troposféricos. Se detectan y eliminan deslizamientos en el ciclo de la fase de la portadora y se suavizan los datos de entrada para reducir el ruido aleatorio y filtrar los componentes residuales del multitrayecto.
 - Cálculo de los datos EGNOS de aumentación, a través de la estimación de las correcciones orbitales y de reloj a aplicar a la señal de los satélites GNSS, las correcciones ionosféricas para la zona de servicio, y los errores residuales asociados a las correcciones.
 - Estimación de la calidad y comprobación interna: evalúa la integridad de las correcciones calculadas en el paso anterior y verifica la consistencia de los errores residuales tras la aplicación de las correcciones. El resultado de esta comprobación se traduce en un indicador que mide la Calidad del Servicio, que se emplea posteriormente por las estaciones NLES para seleccionar el CPF principal.
 - Gestión del procesado del mensaje de salida: genera y da formato a los mensajes de acuerdo con el estándar [Ref.10] y determina la secuencia óptima a transmitir en un determinado ciclo.
2. El ciclo de comprobación o chequeo que recibe los datos obtenidos de las RIMS B y C y su función es verificar, de forma independiente a la unidad de procesado, la integridad del posicionamiento del usuario y la correctitud del mensaje generado por dicha unidad antes y después de transmitirla a los usuarios. Realiza test estadísticos para verificar la fiabilidad de las correcciones y los errores residuales.

Por último, las estaciones NLES reciben los mensajes EGNOS de todas las CPFs y se encargan de generar una señal de tipo GPS (GPS-like signal) y transmitirla a los satélites GEO. Emplea la calidad de servicio (QoS) y los indicadores de integridad proporcionados por las distintas CPFs para seleccionar de forma automática la CPF más adecuada.

Las dos NLES conectadas a cada satélite GEO son completamente intercambiables entre sí, generalmente una está activa y la otra actúa de backup. La conmutación de una a otra se gestiona por la CPF que actúa como maestra y tiene lugar cuando la estación activa ha dejado de transmitir. La transmisión de una NLES puede interrumpirse debido a fallos internos o como consecuencia de los mecanismos de integridad. En cualquier caso, el sistema está diseñado para evitar que haya más de una NLES conectada a la vez a un mismo satélite.

El procesamiento incluye el control de un bucle específico para sincronizar la señal ascendente al tiempo EGNOS a la salida de la antena en la banda L1 del satélite GEO, puesto que estos satélites no disponen de reloj atómico a bordo (al igual que los

satélites GPS). Para la generación de los códigos de modulación PRN típicos de GPS, los mensajes de aumentación de EGNOS se combinan con los códigos PRN asignados a los satélites GEO y con señales adicionales, para formar una señal preliminar, sincronizada con la frecuencia L1, antes de enviarla por el enlace ascendente. Las NLES mezclan estas señales preliminares con las señales ascendentes en la banda C, pues estas señales contienen además otros datos dirigidos al satélite. El satélite GEO, actuando como transpondedor, filtra e invierte en frecuencia las señales EGNOS para la transmisión en la frecuencia L1.

2.4 Aumentación de la señal GNSS

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) permiten determinar la posición de usuarios móviles y estáticos en base a medidas de distancia (rangos) entre un número de satélites pertenecientes a la constelación del sistema y los receptores de estos usuarios. Cada satélite de la constelación emite señales periódicas que son empleadas por los receptores de los usuarios para determinar el tiempo de propagación de estas señales entre emisor y receptor y, a partir de este, la distancia entre ellos. Asimismo, cada satélite emite continuamente un mensaje de navegación que incluye las efemérides, es decir, la información orbital que permite determinar su posición en cualquier punto e instante. De este modo, con la información de al menos tres satélites diferentes, es posible determinar la posición del usuario, y con la información de un cuarto satélite se puede determinar además la información temporal.

Con esta información se obtienen las coordenadas de latitud y longitud, la altitud y la información de tiempo, referida a los sistemas de referencia terrestres y temporales definidos para el sistema.

Sin embargo, la estimación del rango satélite-usuario que realizan estos sistemas GNSS, basada en la medida del tiempo de propagación de la señal, está afectado por diferentes fuentes de error:

- Relojes satelitales: los errores de sincronización de los relojes de los diferentes satélites tienen un efecto directo en la exactitud de las medidas realizadas, y afectan por igual a los usuarios que tienen a la vista un mismo satélite.
- Distorsiones de la señal: cualquier fallo que afecte a la forma de la señal transmitida tendrá impacto en la determinación del tiempo de propagación por parte del receptor de usuario.
- Posición de los satélites: si las órbitas que siguen los satélites no se calculan correctamente por el segmento terrestre el usuario no podrá determinar correctamente su posición, y se producirá un error que dependerá de la posición del usuario.
- Efectos ionosféricos: la ionosfera es una capa ionizada de la atmósfera localizada a cientos de kilómetros de la superficie terrestre, que produce perturbaciones en la señal de navegación transmitida por los satélites. El error

producido depende de la actividad solar (los picos de actividad solar ocurren en ciclos de 11 años) y de la elevación del satélite sobre el horizonte (mayor para bajas elevaciones).

- Efectos troposféricos: la propagación de la señal por la troposfera, la parte más baja de la atmósfera donde tienen lugar la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, está afectada por condiciones atmosféricas específicas que producen errores en las medidas. Cuanto menor sea la elevación del satélite sobre el horizonte, medido desde la ubicación del receptor, el error será mayor.
- Efectos de las reflexiones: al transmitirse la señal de navegación, se producen reflexiones desde la tierra u objetos cercanos, que combinadas con la señal directa produce un sesgo en las medidas que realiza el receptor de usuario, denominado error multicamino.
- Ruido térmico, interferencias y receptores de usuario: debido a que la señal que llega al receptor tiene un nivel de potencia extremadamente bajo, las medidas que realiza dicho receptor estarán afectadas por el ruido ambiente y otras interferencias, por lo que su exactitud dependerá también de la calidad del diseño del receptor del usuario.

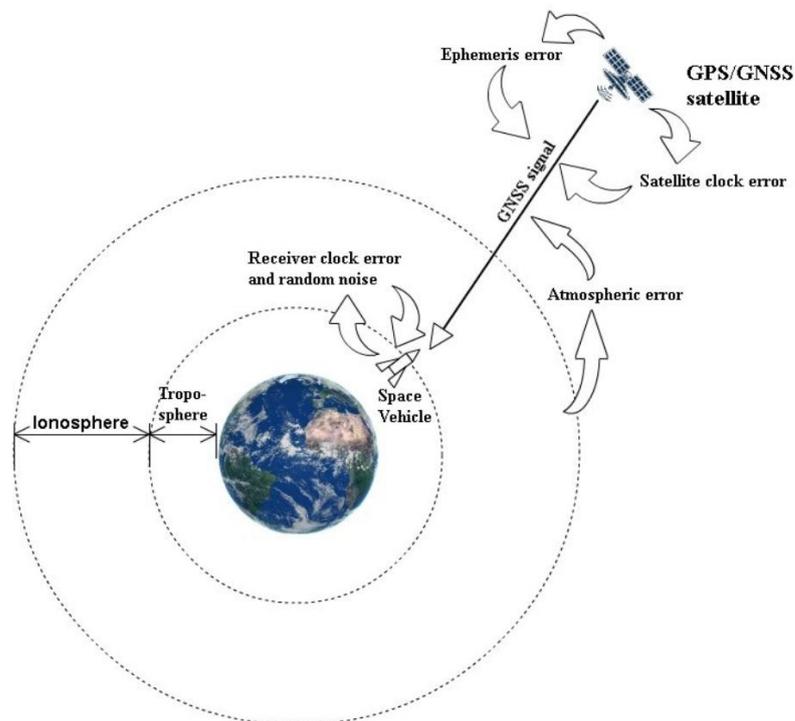


Ilustración 9. Principales fuentes de error de la señal GNSS [Ref.21]

Al calcular su posición, el receptor de usuario combina las medidas de rango de los diferentes satélites que tiene a la vista. En este proceso, aparecen los errores individuales anteriormente descritos y que afectan dichas medidas, combinándose, y resultando en un error agregado en la determinación de la posición denominado UERE (*User Equivalent Range Error*), que es una estimación de la incertidumbre en la medición del rango para un satélite determinado. La relación estadística entre el error

medio para el dominio de rango y el error en la posición está determinada por un factor que depende de la geometría del satélite denominado DOP (*Dilution of Precision*).

El sistema EGNOS mejora las prestaciones de la señal GNSS en base a la transmisión de la siguiente información:

- Señales de características de frecuencia y modulación iguales a la señal GPS L1 desde los satélites GEO. Además, puesto que los datos de navegación de cada satélite GEO se transmiten a través del sistema, se aumenta el número de satélites a disposición de los usuarios.
- Correcciones diferenciales de área amplia (*WAD, Wide Area Differential*) a los servicios de navegación GNSS/GEO, calculadas para mejorar las prestaciones hasta el nivel requerido para las operaciones de precisión de la aviación civil.
- Mensajes de integridad (*GIC, GNSS/Ground Integrity Channel*) que permiten informar sobre la disponibilidad para ofrecer un servicio GNSS/GEO seguro para la navegación.

2.4.1 Sistemas de referencia de EGNOS

La información de posición y de tiempo que se obtiene a partir de la aplicación de las correcciones EGNOS no están referenciadas al tiempo y al sistema de referencia WGS-84 que define la especificación de la interfaz GPS.

Para la información temporal, el sistema de referencia que establece el sistema EGNOS es la escala temporal ENT (*EGNOS Network Time*). En cuanto a la información de posición, se emplea el marco de referencia terrestre ETRF (*EGNOS Terrestrial Reference Frame*) para las coordenadas de posicionamiento. Sin embargo, estos sistemas de referencia mantienen una alineación muy próxima a los sistemas empleados por GPS y las diferencias entre ambos, para la mayor parte de los usuarios, son despreciables.

El tiempo EGNOS ENT es el tiempo de referencia por el que se rige el sistema con el propósito de definir las correcciones. Al hacer uso de estas correcciones, la solución del usuario se calcula respecto al tiempo de la red SBAS en lugar de con tiempo de la constelación satelital GPS. ENT es también el tiempo de referencia empleado por el sistema para la sincronización del reloj de las estaciones RIMS, y su escala de tiempo se basa en un grupo de relojes atómicos desplegados en dichas estaciones. Los CPFs calculan el ENT en tiempo real, usando un modelo matemático que procesa los datos de tiempo recopilados del subconjunto de los relojes de las estaciones RIMS. El tiempo EGNOS (ENT) se dirige continuamente hacia el tiempo GPS (GPST) y la consistencia entre ambos se mantiene en el orden de decenas de nanosegundos.

Todas las correcciones de reloj calculadas por el segmento terrestre de EGNOS y transmitidas a los usuarios están referenciadas a la escala ENT. La diferencia entre el ENT y el tiempo UTC se envía en el mensaje de navegación EGNOS. Aplicando las

correcciones EGNOS a las medidas GPS, se obtiene un tiempo preciso y una solución de navegación referenciada a ENT.

Por tanto, la evaluación de esta diferencia de tiempos y su correcta aplicación son aspectos clave para la obtención de una adecuada solución de navegación. Los usuarios de EGNOS que deseen hacer un uso combinado de medidas GPS referenciadas a escalas de tiempo diferentes deben considerar este offset entre las dos referencias temporales en sus receptores.

2.4.2 Correcciones diferenciales

Las correcciones referentes a la información de posición y reloj de los satélites y la ionosférica, pueden modelarse dinámicamente y por tanto corregirse a través del sistema SBAS. En estos casos, el sistema informa al usuario sobre las correcciones que están disponibles para que sean aplicadas por el receptor. La información modelada se empaqueta en mensajes para enviarla al usuario.

Sin embargo, otro tipo de correcciones, como aquellas que mitigan los efectos de la troposfera, se modelan de forma estática, pues la refracción troposférica es un fenómeno local, y los usuarios calcularán la corrección debida al retardo troposférico, en base a su altura y a otros parámetros meteorológicos.

Los centros de control maestros (MCC) son las unidades dentro del sistema EGNOS encargadas de generar el conjunto de correcciones GPS diferenciales de área amplia (WAD, Wide Area Differential), mediante las siguientes funciones:

- una función de corrección diferencial básica, que proporciona las correcciones para el reloj y efemérides satelitales a aplicar a las medidas de pseudorrangos efectuadas.
- una función de corrección precisa que determina y transmite las correcciones ionosféricas.

Las correcciones diferenciales básicas pueden clasificarse en dos tipos, en función de la naturaleza cambiante de su información: rápidas y de largo plazo o lentas.

Las correcciones rápidas tienen la función de corregir errores que varían rápidamente, como los errores de reloj, mientras que las de largo plazo se emplean en errores que varían más lentamente, como los debidos a fenómenos atmosféricos y errores de largo plazo en el reloj y las efemérides de los satélites. Las correcciones rápidas son comunes a todos los usuarios, por lo que se difunden de forma común.

En cuanto a las correcciones ionosféricas, el sistema elabora un modelo ionosférico, proporcionando a los usuarios la información para calcular el retardo ionosférico a través de puntos de una cuadrícula predefinida.

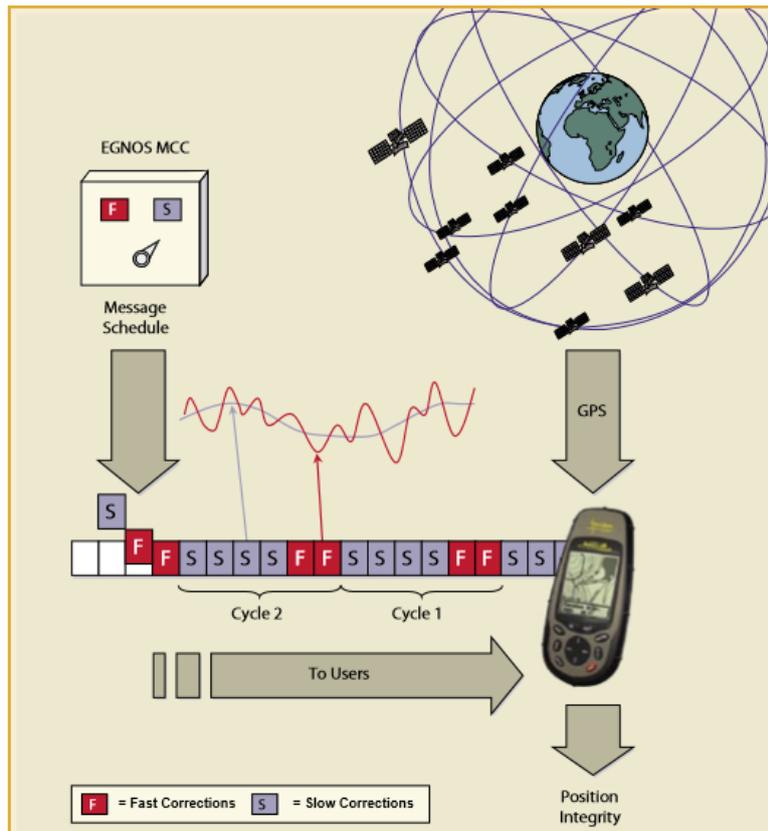


Ilustración 10. Correcciones rápidas y lentas generadas por el sistema [Ref.19]

La estimación del error residual que pueden esperar los usuarios una vez que aplican las correcciones enviadas por el sistema pueden caracterizarse a través de dos parámetros:

- UDRE (*User Differential Range Error*), se trata de una estimación del error de rango residual después de la aplicación de las correcciones del reloj y las efemérides, para un satélite GPS dado.
- GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*), es una estimación del error residual vertical tras la aplicación de la corrección ionosférica para un determinado punto de cuadrícula.

Concretamente, el cálculo estos errores es uno de los aspectos más críticos del sistema y los algoritmos que se emplean son esenciales para la integridad de EGNOS. Estos algoritmos también tienen impacto en la continuidad y la disponibilidad de la señal en el espacio de EGNOS.

Ambos parámetros pueden emplearse para determinar el error agregado, limitado por los errores de posición horizontal y vertical. Esta información es de especial interés para los usuarios del servicio SoL pero también para otros usuarios con necesidad de conocer la incertidumbre que tiene el receptor en la determinación de la posición. A modo de ejemplo, en el Anexo A pueden encontrarse valores de estos errores de posición, obtenidos con EGNOS y con GPS, para diferentes estaciones RIMS situadas en el territorio español.

Como se ha explicado anteriormente, cada satélite tiene que ser monitorizado por múltiples RIMS antes de que se generen las correcciones y los mensajes de integridad.

Para realizar la comprobación de los errores (User Equivalent Range Error) UERE y UDRE (User Differential Range Error) se recaban todas las medidas tomadas por un número de RIMS para un único satélite y se combinan para obtener la información estadística del error de pseudorange, UERE, y su error residual, UDRE. Las correcciones y los errores residuales calculados por la unidad de comprobación de la CPF se comparan con los correspondientes valores obtenidos por la unidad de procesamiento transmitidos a los usuarios. Si los valores de ambos difieren de forma significativa se activa un indicador para no monitorizar dicho satélite.

La comprobación de los parámetros GIVD (*Grid Ionospheric Vertical Delay*) y el GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) se realiza mediante la combinación de la información de las medidas en una única estimación del retardo ionosférico sobre una serie de puntos predefinidos de una cuadrícula bidimensional junto con los errores residuales GIVE. Los cálculos de las correcciones y errores residuales realizados en la unidad de comprobación de la CPF se comparan con los valores calculados por la unidad de procesamiento transmitidos a los usuarios. Si los valores de ambos difieren significativamente se activa un indicador para el punto concreto de la cuadrícula.

2.4.3 Información de integridad

Según la OACI, la integridad es la medida de la confianza en la corrección de los datos proporcionados por un determinado sistema. Incluye la capacidad del sistema para alertar a tiempo a los usuarios cuando el sistema no satisface los requisitos exigidos y no debe por tanto emplearse para el uso previsto.

El concepto de integridad se basa en las siguientes definiciones:

- Límite de alerta: la tolerancia del error no debe excederse sin alertar de ello al usuario final. Para cada tipo de operación, se define un límite de alerta horizontal (HAL) y un límite de alerta vertical (VAL).
- Nivel de protección: se calcula para que el error en la posición no supere un valor límite. En [Ref.10] se definen niveles de protección horizontal (HPL) y vertical (VPL), y las regiones en las que debe asegurarse que esté contenida la posición en los planos horizontal y vertical respectivamente.
- Condición de fuera de tolerancia: se produce cuando el error horizontal (*HPE, Horizontal Position Error*) supera el valor de HPL, o el error vertical (*VPE, Vertical Position Error*) supera el valor de VPL.
- Tiempo de alerta (*TTA, Time To Alert*): es el tiempo máximo permitido que puede transcurrir desde que el sistema de navegación se encuentra fuera de tolerancia hasta que el receptor del usuario emite la alerta.

- Riesgo de integridad: es la probabilidad de que el error de posición sea mayor que el límite de alerta (VAL/HAL) definido para el tipo de operación y el usuario no sea advertido dentro del tiempo de alerta (TTA).
- Evento de integridad: ocurre cuando el error del sistema de navegación (NSE) es mayor o igual que el nivel de protección (HPL/VPL) correspondiente al tipo de servicio y el receptor no reporta una alerta dentro del tiempo de alerta (TTA).

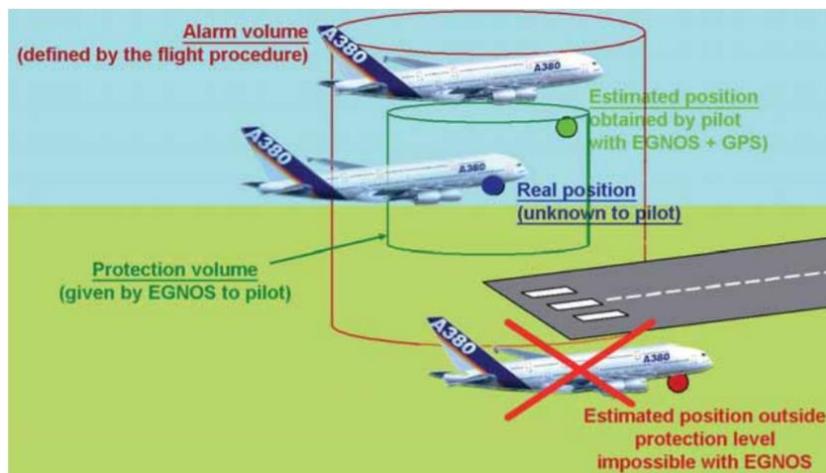


Ilustración 11. Límites relacionados con el concepto de integridad [Ref.20]

EGNOS se ha diseñado para proporcionar niveles de protección que limitan la probabilidad de error a valores del orden de 10^{-7} .

La información de integridad que calcula EGNOS se proporciona a los usuarios a través de la señal en el espacio SIS que se envía a través de los satélites GEO. La aplicación de esta información protege al usuario ante fallos en la información proporcionada por los satélites GPS, y que son detectados por la red de estaciones del segmento terrestre, o ante la transmisión de correcciones diferenciales erróneas o imprecisas, que pueden ser introducidas por fallos no detectados por el segmento terrestre o por el procesamiento de datos afectados por el ruido.

El suministro de información de integridad es complejo, pues algunos de los atributos se determinan en el marco de la infraestructura terrestre del sistema y se transmiten a través de la señal en el espacio SIS, mientras que otros atributos son determinados por el equipamiento o receptores embarcados en la aeronave.

Para las funciones de corrección diferencial básicas y estado de los satélites, la infraestructura terrestre determina la incertidumbre en el error en las correcciones del reloj y de las efemérides. Esta incertidumbre se puede modelar a través de la varianza de una función de distribución normal de media cero que describe el error UDRE (*User Differential Range Error*) para cada fuente tras la aplicación de las correcciones rápidas y de largo plazo, y excluyendo los efectos atmosféricos y errores del receptor.

Para la corrección diferencial precisa, la incertidumbre en el error para las correcciones ionosféricas se modela también por medio de la varianza de una función de distribución normal de media cero que describe el error residual UIRE (*User Ionospheric Range Error*) para cada fuente de origen tras la aplicación de las correcciones ionosféricas. Esta varianza se determina a través de un modelo ionosférico que usa el error GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) transmitido.

Existe una probabilidad finita de que el receptor SBAS no reciba un mensaje SBAS. En estos casos, para poder continuar la navegación, los sistemas SBAS difunden parámetros de degradación de la señal SIS. Estos parámetros se usan en modelos matemáticos que caracterizan el error residual adicional para las correcciones diferenciales inducido por el uso de datos antiguos pero activos. Estos modelos se usan para modificar de forma correspondiente las varianzas UDRE y UIRE.

La incertidumbre en los errores individuales se emplea por el receptor para calcular un modelo de error de la solución de navegación. Esto se realiza proyectando modelos de error de los pseudorrangos al dominio de la posición. El nivel de protección horizontal (HPL) proporciona el límite del error de posición horizontal con una probabilidad derivada de los requerimientos de integridad. De forma análoga, el nivel de protección vertical (VPL) proporciona el límite para la posición vertical. De esta forma, si el valor calculado para HPL supera el límite de alerta horizontal (HAL) definido para una operación en particular, la integridad del sistema no resulta adecuada para dar soporte a dicha operación. Lo mismo ocurre para aproximaciones de precisión y APV, si el VPL supera el límite de alerta vertical (VAL).

Uno de los retos principales para un proveedor SBAS es determinar las varianzas UDRE y GIVE para que se cumplan los requisitos de integridad en términos de niveles de protección sin que se produzca un impacto en la disponibilidad. Los métodos generales que se aplican para determinar los modelos de varianza se describen en [Ref.9].

2.5 Generación y características de la señal SIS

2.5.1 Generación de la señal SIS

Como el sistema EGNOS es un sistema SBAS, su señal en el espacio SIS (*Signal In Space*) presenta las mismas características que las señales SBAS. La especificación SBAS se describe en detalle en el Apéndice A del documento [Ref.10] y en el Apéndice B de [Ref.9].

Las características de la señal se han diseñado para que las modificaciones necesarias en el hardware de un receptor GPS estándar sean mínimas. Así, los satélites GEO transmiten en la frecuencia de portadora L1 (1575,42 MHz), emplean los códigos PRN de la señal C/A (Coarse/Acquisition) y una modulación similar a la del sistema GPS.

Cada código PRN (pseudoaleatorios) emplea, al igual que en GPS, un código Gold formado a partir de 2 registros de desplazamiento LFSR de 10 etapas. Sumando en módulo 2 las salidas de ambos registros, se obtiene un código Gold con una longitud máxima de secuencia de $2^{10}-1=1023$ chips (concepto equivalente al bit, pero que no pertenece a una palabra o byte de información, sino a un código de identificación).

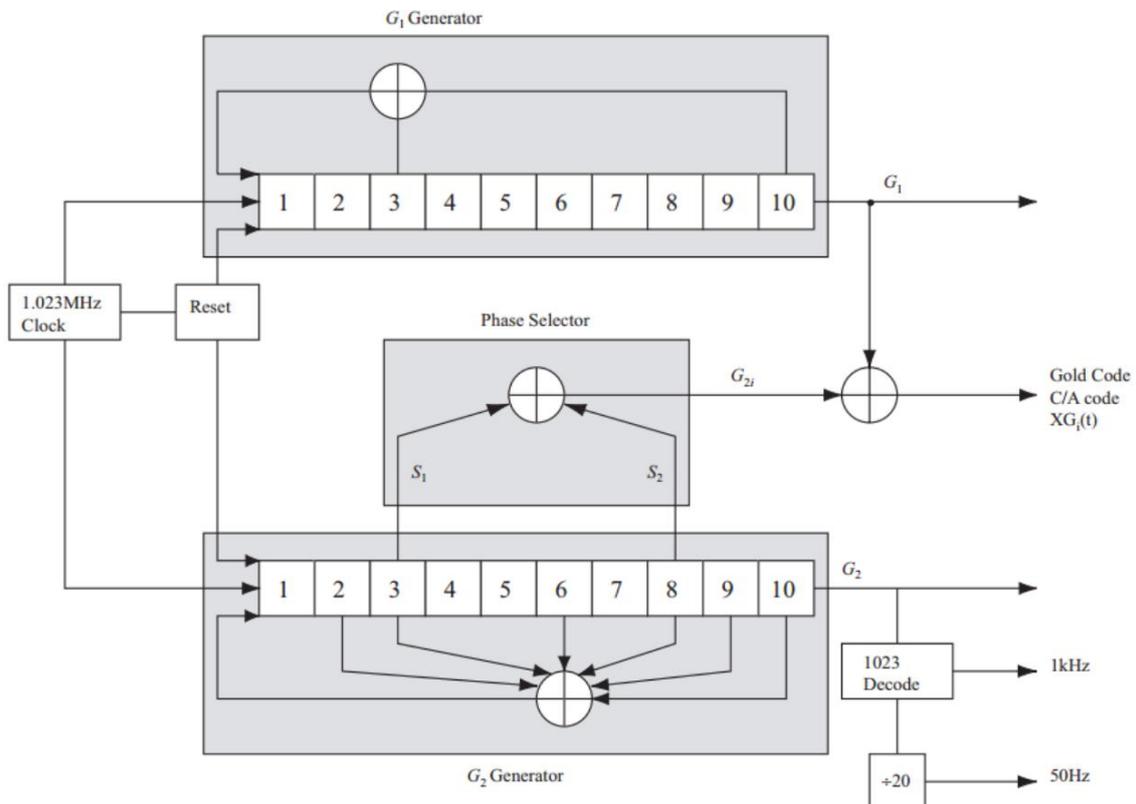


Ilustración 12. Generación código C/A

Los códigos PRN están formados por series de 1023 chips, con una duración de $1 \mu s$. Se repiten cada 1 ms, lo que da lugar a una tasa de chip de 1023 MHz. Presentan las siguientes características:

- Comportamiento espectral similar al ruido, con componentes en todo el rango de frecuencias.
- Una función de autocorrelación que presenta un máximo para una determinada marca de tiempo, y lóbulos secundarios con un nivel bajo para el resto de los instantes.
- Una función de correlación cruzada que no presenta ningún máximo absoluto.

Cada satélite, tanto de la constelación GPS como los satélites GEO, tiene asignado un código PRN, que se correla en el receptor para recibir la señal del satélite separada del resto de la señal. Para ello es de suma importancia que el receptor y el satélite se encuentren correctamente sincronizados.

El código C/A generado se suma en módulo 2 con el mensaje de navegación. El resultado de esta suma se combina con la portadora analógica L1, mediante una modulación de fase BPSK (Binary Phase Shift Keying), de forma que la portadora cambia de fase en 180° cuando el resultado de la suma en módulo 2 cambia de valor.

La implementación recomendada para el codificador SBAS se puede realizar bien mediante un retardo programable para el registro de desplazamiento G2, o bien mediante un estado inicial programable del registro de desplazamiento G2, como se observa en las Ilustraciones 13 y 14.

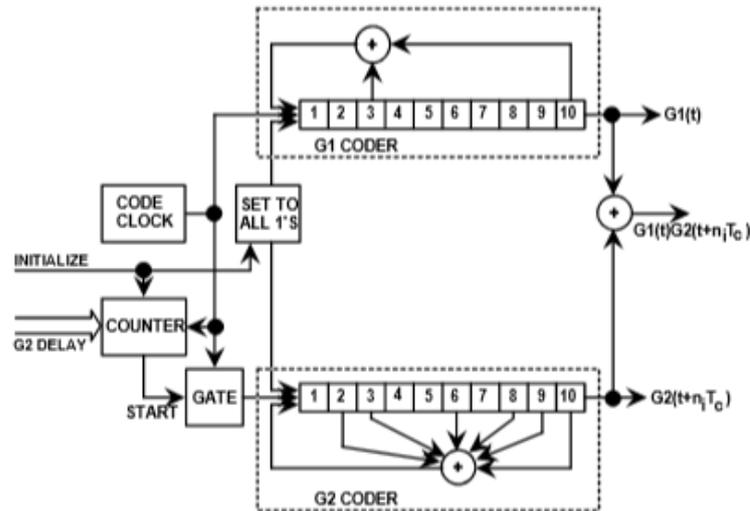


Ilustración 13. Codificación SBAS. Opción con retardo programable [Ref.10]

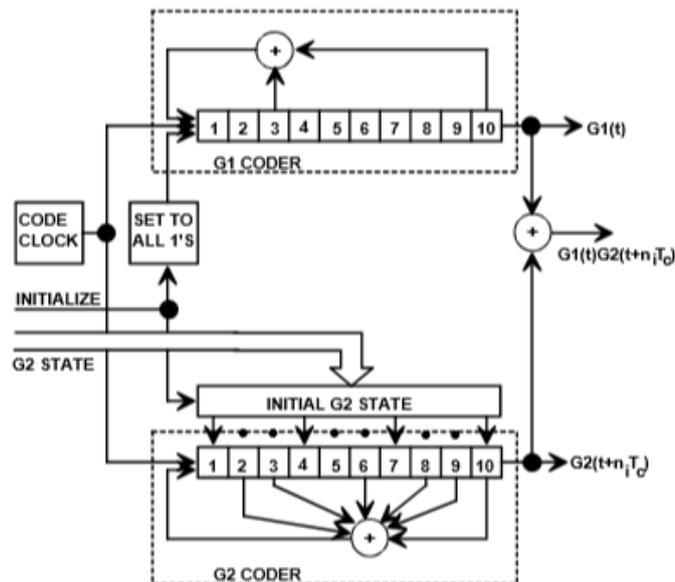


Ilustración 14. Codificación SBAS. Opción con estado inicial programable [Ref.10]

Por tanto, la señal que se transmite al usuario es una combinación de un código PRN como los de la familia GPS, de 1023 bits, y un mensaje de navegación de 250 bps que contiene las correcciones y los datos de integridad elaborados por el segmento terrestre de EGNOS.

El mensaje de navegación en crudo del sistema contiene 500 bits. Estos datos se codifican con un código FEC de manera que cada segundo se transmite al usuario la mitad de la información (250 bits/segundo). Los datos se codifican a una tasa de 2 símbolos por bit usando una codificación convolucional de Viterbi con longitud restringida a 7, con un rendimiento de 500 símbolos por segundo.

La codificación convolucional empleada se basa en registros de desplazamiento conectados con sumadores de módulo 2.

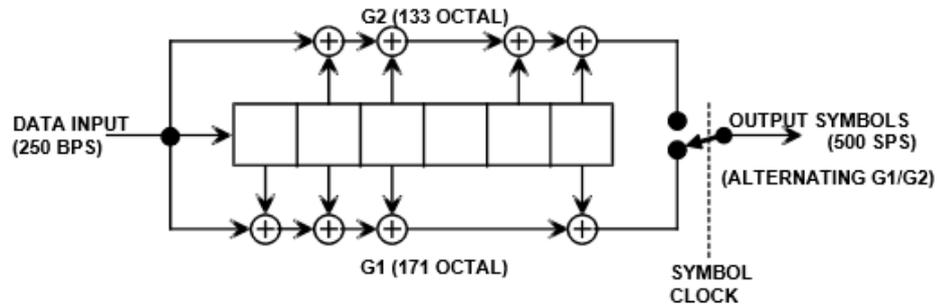


Ilustración 15. Codificación convolucional [Ref.10]

La codificación convolucional con decodificación de Viterbi es de las técnicas FEC más adecuadas en canales en los que la señal transmitida se ve corrompida principalmente por ruido gaussiano blanco y aditivo (AWGN), como es el caso de las redes de comunicación satelitales geoestacionarios.

Cada mensaje de 250 bits se puede dividir en cuatro secciones, en donde el bit 0 es el bit más significativo, y el primero que se transmite/recibe:

- Preámbulo (8 bits): los bits 0-7 se utilizan para la sincronización de la trama.
- Identificador del tipo de mensaje (6 bits): los bits 8-13 definen el tipo de mensaje (MT, Message Type).
- Campo de datos (212 bits): los bits 14-225 incluyen la información correspondiente a las correcciones diferenciales (WAD) y de integridad (GIC).
- Información de paridad (24 bits): los bits 226-249 contienen el código de redundancia cíclica (CRC) que ofrece protección frente a ráfagas y errores aleatorios.

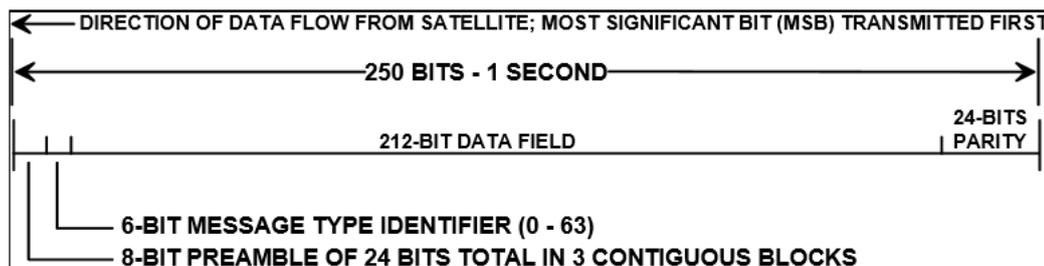


Ilustración 16. Formato del mensaje SBAS [Ref.10]

Los datos correspondientes al preámbulo, en total 24 bits, se distribuyen a través de tres palabras sucesivas, lo que implica que su inicio se sincroniza con las subtramas

GPS cada 6 segundos. Las tres palabras que lo componen son la siguiente secuencia: 01010011 (83) - 10011010 (154) - 11000110 (198).

Los 6 bit del identificador de mensaje (MT) permiten definir hasta 64 mensajes diferentes.

El campo de datos se describe en la sección 2.6.

La información de paridad proporciona protección frente a ráfagas y errores aleatorios. Los generadores de paridad empleados se describen en detalle en [Ref.10] .

Los mensajes se interrelacionan a través de los parámetros IOD (Issue of Data), presentes en el campo de datos, que relacionan también los mensajes satelitales con las efemérides del servicio de navegación.

La secuencia de transmisión de los mensajes no es fija y es responsabilidad del proveedor de servicio SBAS/EGNOS decidir el mensaje a transmitir en cada segundo. En [Ref.10] se definen requisitos relativos al tiempo de refresco para cada tipo de información y para las condiciones de alerta, cuando existen problemas con información de uno o varios satélites o con la información ionosférica. En caso de alerta, el sistema debe repetir el mensaje con la información de alerta hasta tres veces (es decir, cuatro mensajes en cuatro segundos en total).

2.5.2 Características RF

La frecuencia de portadora, como se ha comentado, es de 1575.42 MHz, coincidente con la señal L1 de GPS, al igual que la modulación empleada, de tipo BPSK. La señal transmitida está polarizada circularmente en sentido horario (RHCP).

El espectro de la señal debe cumplir que el 95% de la potencia transmitida esté contenida dentro de una banda de ± 12 MHz centrada en la frecuencia de portadora. El ancho de banda de la señal transmitida por un satélite SBAS debe ser de al menos 2.2 MHz.

Para los satélites del sistema en órbita antes de 2014, en condiciones de línea de visión directa y ángulos de elevación superiores a los 5° sobre la superficie de la Tierra, el nivel de señal recibida a 3dBi por una antena linealmente polarizada está entre -161 dBW y -153 dBW, considerando una orientación de la antena ortogonal a la dirección de propagación. Por debajo de -164 dBW, ante presencia de interferencias, es posible que los receptores no puedan realizar correctamente la función de seguimiento.

Otras características de las señales SBAS son:

- La densidad espectral del ruido de fase de la portadora sin modular es tal que un PLL de 10 Hz de ancho de banda de ruido sea capaz de seguir a la portadora con una precisión de 0,1 rad
- El desplazamiento Doppler de la señal transmitida por un satélite GEO, percibido por un usuario estático, es menor de 40 m/s en el peor caso y es debido al movimiento relativo de los GEOs.
- La estabilidad de la frecuencia de portadora en el corto plazo a la entrada de la antena del receptor es menor a $5 \cdot 10^{-11}$ durante los diez primeros segundos, sin considerar los efectos de la ionosfera y del desplazamiento Doppler.
- La pérdida de correlación, de la señal recuperada debido a imperfecciones de la modulación y la distorsión en la forma de onda de la señal no debe exceder de 1 dB.

2.6 Estructura del mensaje EGNOS

Aunque EGNOS emplea la misma frecuencia y códigos de rango que GPS, el mensaje de datos tiene un formato diferente. El mensaje sigue un ciclo de trabajo de 6 segundos, para cumplir con los requisitos de integridad y minimizar el tiempo para la inicialización de EGNOS.

Los datos de navegación de la señal EGNOS se componen de diferentes tipos de mensaje (*MT, Message Type*) según se define en el estándar SBAS.

Aunque es posible definir 64 (2^6) tipos de mensajes diferentes, solo se emplean 20, que pueden clasificarse en mensajes de información satelital, ionosférica y mensajes auxiliares.

Message Type	Contents	Purpose
0	Don't Use (SBAS test mode)	Discard any ranging, corrections and integrity data from that PRN signal. Used also during system testing
1	PRN Mask	Indicates the slots for GPS and EGNOS GEO satellites provided data
2-5	Fast corrections	Range corrections and accuracy
6	Integrity information	Accuracy-bounding information for all satellites in one message
7	Fast correction degradation factor	Information about the degradation of the fast term corrections
9 ⁴	GEO ranging function parameters	EGNOS GEO satellites orbit information (ephemeris)
10	Degradation parameters	Information about the correction degradation upon message loss
12	SBAS network Time/UTC offset parameters	Parameters for synchronisation of EGNOS Network time with UTC
17	GEO satellite almanacs	EGNOS GEO satellites Almanacs
18	Ionospheric grid point masks	Indicates for which geographical point ionospheric correction data is provided
24	Mixed fast/long-term satellite error corrections	Fast-term error corrections for up to six satellites and long-term satellite error correction for one satellite in one message
25	Long-term satellite error corrections	Corrections for satellite ephemeris and clock errors for up to two satellites
26	Ionospheric delay corrections	Vertical delays/accuracy bounds at given geographical points
27	EGNOS service message	Defines the geographic region of the service
63	Null message	Filler message if no other message is available

Tabla 3. Formato del mensaje SBAS [Ref.7]

Mensajes con información satelital

El **MT1** incluye la asignación de la máscara correspondiente al código PRN (210 bits), entre las aplicables a los satélites GNSS y los GEOs, más 2 bits IODP (Issue of Data PRN Mask) para indicar la aplicación de las correcciones a dicha máscara. En vez de enviar el código PRN para cada corrección, se envía una máscara para ahorrar espacio en los mensajes. Así, para para indicar el satélite PRNi se pone el bit i-ésimo a 1, hasta un máximo de 51 satélites en un mismo mensaje de los 210 posibles.

La asignación de las máscaras se hace conforme a lo indicado en la Tabla 4.

PRN Slot	Assignment
1 to 37	GPS/GPS Reserved PRN
38 to 61	GLONASS Slot Number plus 37
62 to 119	Future GNSS
120 to 138	GEO/SBAS PRN
139 to 210	Future GNSS/GEO/SBAS/Pseudolites

Tabla 4.. Formato del mensaje SBAS [Ref.10]

Los **MT 2-5** corresponden a los mensajes de correcciones rápidas (información de efemérides y reloj de los satélites GPS). El MT 2 contiene la información de los primeros 13 satélites de la máscara, el MT 3 de los 13 siguientes y así sucesivamente. Estos mensajes de corrección se transmiten en función del número de satélites contenidos en la máscara. Si en el último mensaje el número es menor que 6 el mensaje puede sustituirse por el MT24.

Estos mensajes también contienen información sobre el parámetro de integridad σ^2_{UDRE} (UDREi), que indica la exactitud de las correcciones rápidas y de largo plazo, y si el satélite es utilizable o no, o bien no se está monitorizando.

MT6 contiene información de integridad de hasta un máximo de 51 satélites que pueden estar presentes en la máscara PRN, y también el indicador de versión para las correcciones rápidas (IODFj, con j=2..5), para relacionar los valores UDREi con las correcciones rápidas de los MT2-MT5 o MT24. Actualiza el indicador UDREI y trasmite alertas de satélite de forma inmediata en caso necesario. Los UDREI incluidos en el MT6 se aplican a los satélites definidos en la última máscara PRN recibida.

MT7 incluye el tiempo de latencia del sistema, así como la degradación con el tiempo de las correcciones rápidas recibidas en MT2-MT5 o MT24, para calcular la degradación de las correcciones para diferentes fases de vuelo.

MT9 contiene los datos de navegación de los satélites GEO, que no forman parte de ninguna de las constelaciones GNSS y, por tanto, las efemérides de estos no están disponibles externamente, por lo que es el sistema SBAS el que debe proporcionarlos. Además de la información sobre posición, velocidad y aceleración de los GEO, se proporciona un indicador de exactitud que representa la correctitud de la señal de los

satélites GEO, URA (*User Range Accuracy*), igual que el definido para los satélites GPS.

MT17 contiene los datos de almanaque de hasta tres satélites GEO, es decir, los datos del estado de funcionamiento de cada satélite y los datos orbitales aproximados. La información de este MT indica al usuario de la existencia de los GEO, su localización y funcionamiento general para la adquisición. Sin embargo, no deben usarse estos datos para calcular la posición, para ello debe emplearse los datos del MT9.

MT24 contiene correcciones satelitales rápidas y de largo plazo, se transmite si el número de satélites en el último mensaje de correcciones rápidas es menor o igual a 6. La primera mitad del mensaje incluye correcciones rápidas para estos satélites mientras que la segunda mitad tiene la misma información de largo plazo que el MT25 (correcciones de largo plazo para uno o dos satélites, dependiendo del valor del código de velocidad).

MT25 contiene las correcciones de errores satelitales de largo plazo, es decir, las estimaciones del error en las variaciones lentas de las efemérides y el reloj de los satélites. Estas estimaciones se realizan respecto a los parámetros transmitidos por el sistema GNSS, y no se aplican a los satélites GEO del propio sistema SBAS (estos datos se incluyen en MT9), aunque sí a satélites pertenecientes a otros sistemas SBAS.

Las estimaciones van acompañadas de un IODP asociado a la máscara PRN. Las correcciones se envían en función de la velocidad de variación, para errores de largo plazo que varían con mayor rapidez se repiten más frecuentemente que aquellas cuyos errores varían más lentamente.

Se emplea la versión de datos de las efemérides, IODE, para relacionar las correcciones con las efemérides usadas para calcular dichas correcciones.

En EGNOS, para los satélites GEO pertenecientes a otros sistemas SBAS que proporcionan correcciones de largo plazo en mensajes MT25, dichas correcciones deben relacionarse con las correspondientes efemérides del MT9 procedente del otro SBAS. Para ello, EGNOS emplea el IODN del satélite, incluido en el MT9, aunque este parámetro ha sido eliminado del estándar.

El MT25 se divide en dos mitades, cada una de las cuales contiene información que depende de un parámetro denominado código de velocidad:

- Cuando el código de velocidad vale 0, no se incluye información de deriva de las componentes orbitales y de reloj, y se incluyen correcciones hasta para dos satélites.
- Cuando su valor es 1, sí se incluye información de deriva de las componentes orbitales y de reloj, y se incluyen las correcciones para un único satélite.

MT28 es un mensaje opcional, que puede transmitirse para proporcionar la matriz de covarianzas relativas de los errores de efemérides y de reloj. Esta matriz contiene información de σ^2_{UDRE} que especifica la confianza en la corrección dependiendo de la localización del satélite, y se actualiza de forma similar a las correcciones de largo plazo. Cada mensaje es capaz de incluir las matrices para dos satélites.

Mensajes con información ionosférica

El retardo ionosférico se calcula a partir de una cuadrícula definida a una altitud de 350 km sobre el elipsoide terrestre, en el que se establecen una serie de puntos, conocidos como IGP (*Ionospheric Grid Points*) para los cuales se transmiten las correcciones aplicables a la frecuencia de la señal L1, en forma de estimación del retardo vertical, GIVD (*Grid Ionospheric Vertical Delay*).

Para estimar el error ionosférico de cada satélite en línea de vista, el receptor debe identificar los puntos de perforación ionosférica IPP (*Ionospheric Pierce Point*), que son aquellos en los que la línea entre el receptor y el satélite interseca con la capa atmosférica a la altitud de 350 km. El receptor calcula una estimación del retardo para cada IPP a partir de los valores de IGP cercanos conocidos, mediante interpolación. Para ello el receptor considera también el ángulo con el que se atraviesa la ionosfera.

El **MT18** contiene la máscara ionosférica, con los puntos IGP de la cuadrícula. La cuadrícula consta de 2192 IGPs, distribuidos sobre un mapa en el que se representa la superficie terrestre con la proyección de Mercator, en 11 bandas, 9 de ellas verticales, con 201 puntos en cada banda, y 2 horizontales alrededor de los polos. Como el retardo ionosférico depende de la actividad solar, se definen mayor cantidad de IGPs para latitudes más bajas.

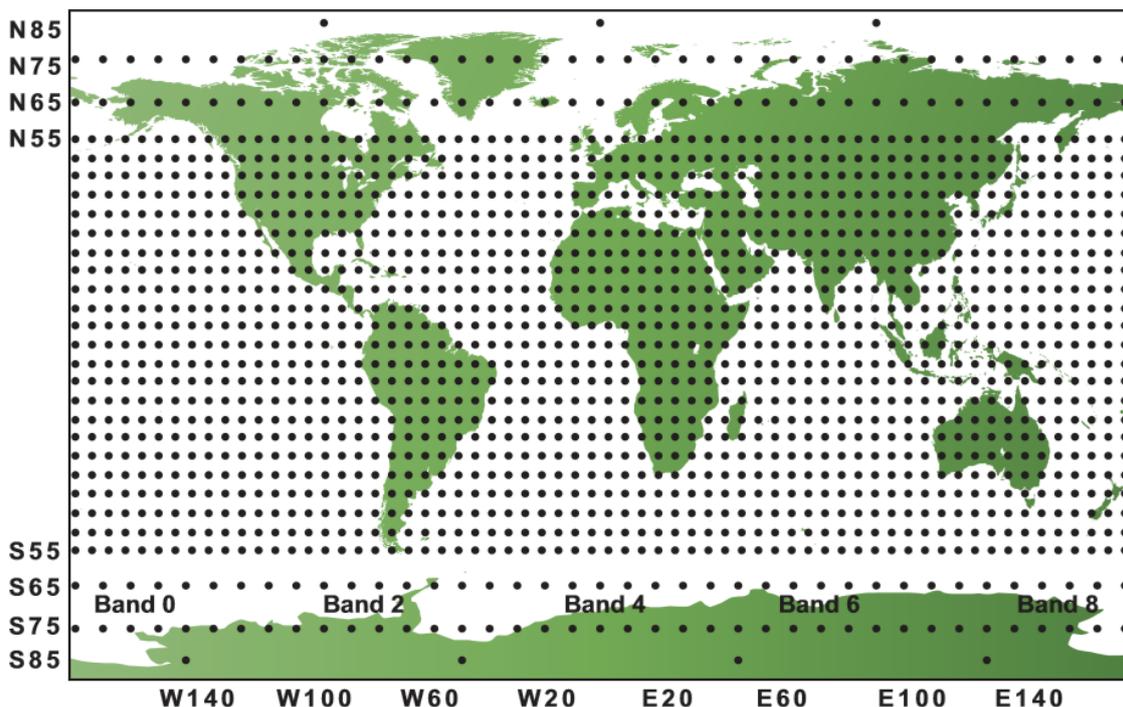


Ilustración 17. Máscara ionosférica con IGPs predefinidos [Ref.20]

Cada mensaje MT18 contiene la información la máscara para una banda, con el fin de optimizar el tamaño del mensaje. Un bit a 1 en la posición i -ésima indica que se proporciona la información de corrección ionosférica para el i -ésimo IGP.

También se incluye información sobre la versión de datos ionosféricos, IODI, en el mensaje para asegurar que las correcciones se aplican adecuadamente.

Es necesario indicar el número de bandas transmitidas, pues el receptor debe conocerlo para comprobar si dispone de toda la información. También es necesario haber recibido todos los MT18, es decir, la máscara completa, antes de comenzar a usar la información transmitida en los MT26. El usuario solo necesita la información del retardo vertical para IGPs situados a una cierta distancia respecto de su localización. Un satélite GEO solo transmitirá IGPs en las bandas (hasta 8) que cubran los IGPs visibles en el área e intersección de su huella con el volumen de servicio del sistema de control.

MT26 proporciona los datos para calcular las correcciones por el retardo ionosférico o GIVD y su precisión (σ^2_{GIVE}) a través de unos indicadores denominados GIVEI (indicadores GIVE) para los IGPs configurados en la máscara. Se incluye también el parámetro IODI para poder asociar la información con la máscara IGP correspondiente.

Sobre la base de los datos proporcionados de GIVD y σ^2_{GIVE} para cada satélite a la vista, y aplicando un factor de oblicuidad calculado desde la elevación del satélite desde la posición del usuario, el receptor obtiene una corrección de inclinación de distancia y un valor de desviación típica para el error ionosférico residual (σ^2_{UIRE}).

Cada mensaje contiene el número de la banda, cada banda se divide en un máximo de 14 bloques y cada bloque contiene 15 IGPs. Por tanto, se puede proporcionar información de 15 IGPs como máximo por mensaje. El identificador de bloque indica la localización del IGP en la máscara y a qué IGPs aplican las correcciones.

El estado para cada IGP puede ser que existan estimaciones de retardo IGP y GIVEI para su uso, que el IGP no aparezca en la máscara o no tenga información de retardo y GIVEI, o de alerta para que no se usen los datos si se encuentra alguna inconsistencia en estos.

Mensajes con información auxiliar

Otros mensajes que no están relacionados directamente con correcciones de los satélites o ionosféricas, sirven, por ejemplo, para calcular la posición de navegación del usuario en aproximaciones de precisión (PA), calcular de forma precisa el tiempo UTC, o degradar el UDRE en ciertas regiones.

MT0 se usa para pruebas, y no debe ser considerada para aplicaciones críticas desde el punto de vista de la seguridad. Cuando se recibe, la integridad del sistema no está asegurada.

MT10 contiene parámetros de degradación, que se emplean para calcular la degradación de parámetros para las correcciones rápidas y de largo plazo (σ^2_{fit}) y las correcciones ionosféricas ($\sigma^2_{\text{ionogrid}}$) para operaciones de aproximación de precisión (PA). Con el fin de garantizar la integridad incluso cuando no se reciben algunos de los mensajes de correcciones un usuario que realice este tipo de operaciones debe aplicar modelos de degradación de dicha información. Estos modelos se describen en RTCA MOPS [Ref. XX].

MT12 incluye información sobre parámetros de offset temporal entre los diversos tiempos del sistema. Permite la sincronización de ENT con el tiempo UTC en el formato definido por GPS ICD.

MT27 es un mensaje opcional que se emplea para definir el área geográfica en la que se presta el servicio. Se incrementa el UDRE transmitido en los MT 2-5, 6 o 24 en las áreas seleccionadas.

2.7 Evolución del sistema EGNOS

La versión de EGNOS actualmente desplegada, desde enero de 2020, es la v2.4.21, en la que se ha mejorado gradualmente la cobertura en las zonas de la ECAC (*European Civil Aviation Conference*) situadas más al este y al norte. Las mejoras en las capacidades del sistema han sido posibles gracias a la incorporación de estaciones RIMS adicionales y nuevos satélites GEO.

La evolución del servicio SoL en el corto plazo, de acuerdo con la hoja de ruta definida [Ref.22], mejorará el nivel de servicio APV-I y LPV-200, extendiendo el área de prestación hacia el sureste de Europa. También está previsto una mejora en la robustez del sistema, debido a la optimización de los algoritmos de monitorización ionosféricos.

Adicionalmente a esta evolución del sistema y los servicios, existen mejoras que se extienden a un horizonte temporal a medio plazo, relacionadas principalmente con:

- Futuras mejoras de los niveles de servicio, y extensión del área de cobertura hacia el noreste, este y sureste de Europa, que contemplan despliegues de nuevas estaciones RIMS.
- Evolución del sistema para evitar obsolescencias, y garantizar los niveles requeridos de robustez y estabilidad a lo largo de la vida operacional del servicio EGNOS.

- La versión 3 de EGNOS, que se introducirá gradualmente, con una primera fase (v3.1) prevista en 2024 con aumentación en la frecuencia L1 y correcciones ionosféricas mejoradas, y una fase subsiguiente (v3.2) en 2025 con aumentación en la frecuencia L5 o frecuencia dual GPS-Galileo. Además, la modernización de la constelación satelital con el nuevo GEO-3 también servirá como soporte para la transición de la generación actual a la futura EGNOS v3.

La versión 3 de EGNOS dotará al sistema de capacidad multi constelación y multi frecuencia (MC/MF), ya que permitirá soportar señales GPS y Galileo en las frecuencias L1 y L5. Como resultado, el sistema será capaz de proporcionar servicios que mejorarán los requisitos de la CAT I para los usuarios de la aviación civil. Esta capacidad permitirá además de mejorar los rendimientos y la exactitud y seguridad del sistema, habilitar nuevos servicios y aplicaciones basadas en EGNOS para el sector de la aviación. La versión 3 de EGNOS requerirá de un nuevo receptor para poder operar con la frecuencia L5 (1176.45 MHz), que incluirá nuevos tipos de mensajes.

La Comisión Europea tiene la responsabilidad de definir la hoja de ruta para la evolución del programa EGNOS más allá del lanzamiento del servicio EGNOS V3. Esta evolución deberá contemplar la implementación de operaciones más seguras y eficientes para la aviación. En este sentido, la evolución futura de los servicios de EGNOS en el campo de la aviación apuntan a las siguientes direcciones [Ref.23]:

- Extender la provisión de los servicios EGNOS a los ámbitos CNS (Comunicación, Navegación y Vigilancia) y ATM (Gestión del Tránsito Aéreo) más allá de la navegación, especialmente hacia los servicios de vigilancia (ADS-B) y también como soporte a los servicios de comunicación.
- Proporcionar propiedades adicionales de robustez ante amenazas o ataques, intencionados o no, a los servicios de navegación EGNOS, por ejemplo, añadiendo autenticación a las señales GNSS o características ad hoc a nivel de antena y receptor.
- Mejorar las prestaciones de navegación, la posición y el tiempo, proporcionadas a nivel de usuario, por ejemplo, mejorando la exactitud en la posición vertical y el tiempo de alerta para poder soportar procedimientos de aproximación CAT II.

El objetivo perseguido es analizar y definir los elementos motivadores alrededor de estos tres ejes después de 2025, determinar las restricciones y prerequisites, y evaluar el valor añadido para los usuarios. Este análisis debe tener en cuenta cada una de las áreas anteriores por separado y determinar en qué condiciones será beneficioso para el programa implementar estos servicios. El análisis se centrará en:

- Identificar requisitos de los usuarios para cada uno de estos nuevos servicios y cómo se traducirán en requisitos de servicio para EGNOS.

- Definir las restricciones regulatorias asociadas y el análisis de seguridad requerido previamente a que el servicio pueda implantarse operacionalmente.
- Analizar el valor añadido para los usuarios finales de la aviación, definir cómo proveer el servicio y establecer un orden de prioridad para la implantación de los servicios.

3. Estudio sobre la aplicación de EGNOS en operaciones aeronáuticas

3.1 Caso de uso: procedimientos de aproximación RNP APCH (mínimos LPV)

3.1.1 Introducción a la especificación RNP APCH como parte del concepto PBN

El concepto PBN (*Performance Based Navigation*) fue establecido por la OACI para regular, armonizar y controlar las múltiples soluciones relacionadas con la navegación de área (RNAV), estableciéndose una navegación no basada en sensores, sino en una serie de requisitos de prestaciones mínimas que deben cumplir los sistemas de navegación embarcados, funcionalidades específicas, sensores de navegación a emplear y requisitos de certificación relativos a la tripulación y a la aeronave. [Ref.24] es el documento de la OACI que define los requisitos específicos que deben cumplir las aeronaves que operan en un espacio aéreo designado.

El conjunto de estos requisitos necesarios para las operaciones PBN dentro de un espacio aéreo definido se denomina “especificación de navegación”, y dentro del concepto PBN se definen dos clases diferentes: RNAV y RNP [Ref.25]. La especificación RNAV no incluye requisitos de vigilancia y alerta autónomas de las prestaciones a bordo, mientras que sí se incluyen en el caso de la especificación RNP, que es la que cubre todos los segmentos de la aproximación (inicial, intermedia, final y frustrada).

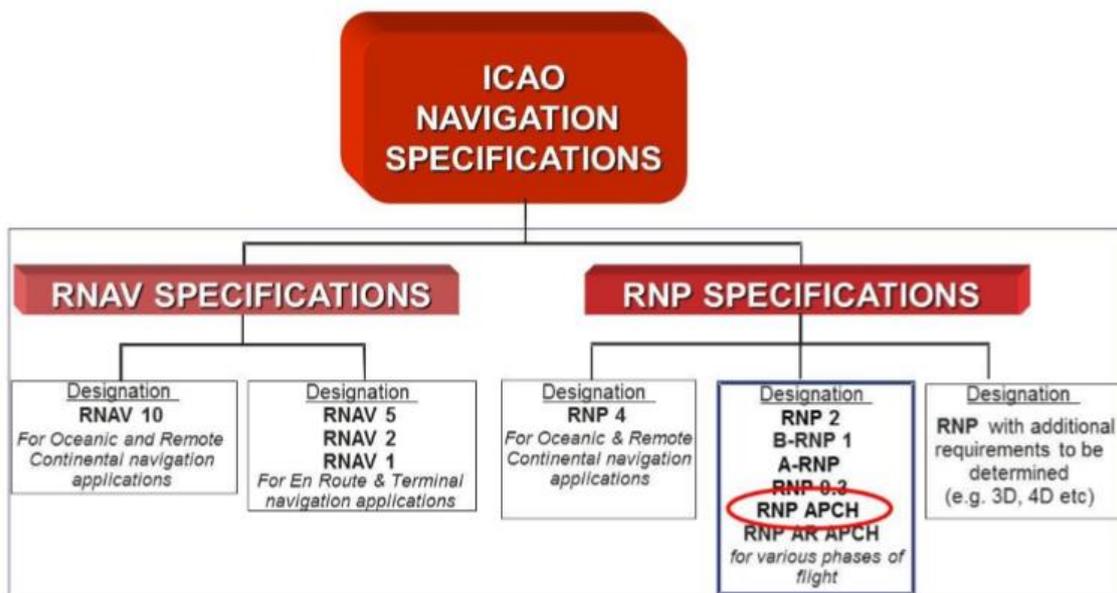


Ilustración 18. Especificaciones de navegación PBN [Ref.26]

De acuerdo con esto, los operadores aéreos que deseen operar procedimientos de aproximación RNP deben contar con flotas debidamente equipadas, así como impartir formación específica para el personal de vuelo que vaya a llevar a cabo estas operaciones.

Esencialmente, la PBN identifica los requisitos de navegación: precisión, integridad, continuidad y funcionalidades necesarias para las operaciones propuestas en un determinado espacio aéreo, independientemente de los medios por los que se satisfacen dichos requisitos.

En el marco de la PBN, los requisitos de navegación genéricos se definen en función de los requisitos operacionales.

Concretamente para la especificación RNP APCH se definen los mínimos aplicables a las operaciones de aproximación indicados en la Ilustración 19.

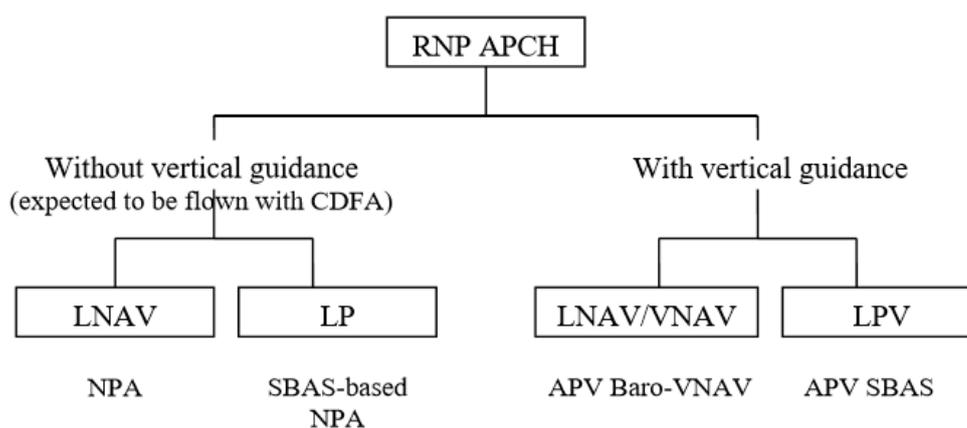


Ilustración 19. Mínimos de operación de la especificación RNP APCH [Ref.27]

- RNP APCH LNAV permite aproximaciones 2D con guiado lateral basadas en el uso de GNSS.
- RNP APCH LP permite aproximaciones 2D con guiado lateral con prestaciones de localizador basadas en GNSS y EGNOS.
- RNP APCH LNAV/VNAV permite aproximaciones 3D basadas en el uso de GNSS con guiado vertical barométrico.
- RNP APCH LPV permite aproximaciones 3D con guiado vertical basadas en el uso de GNSS y EGNOS.

En la Ilustración 20 pueden verse representados estos conceptos.

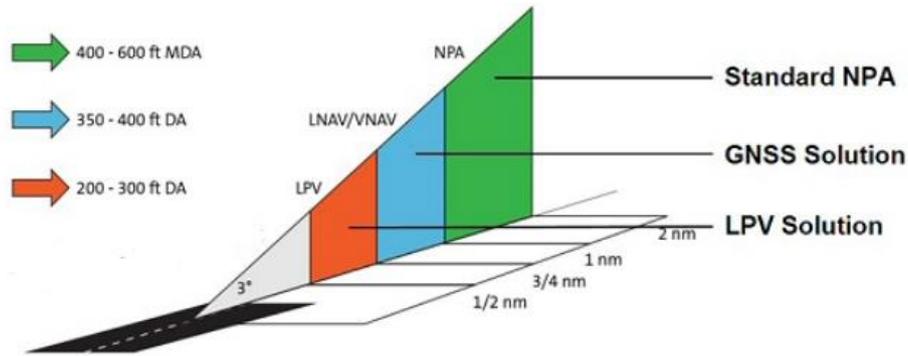


Ilustración 20. Mínimos de operación de la especificación RNP APCH [Ref.28]

3.1.2 Provisión del servicio EGNOS SoL

En la provisión del servicio SoL de EGNOS intervienen varios actores principalmente [Ref.26]:

- Proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP): son entidades públicas o privadas que prestan servicios de control de tráfico aéreo, información aeronáutica, CNS (comunicaciones, navegación y vigilancia) o servicios meteorológicos para la navegación aérea, en el marco legislativo del Cielo Único Europeo y bajo la certificación correspondiente.
- Proveedor de servicios EGNOS (ESP): este rol lo desempeña en la actualidad la empresa ESSP, responsable de la operación, prestación de servicios y mantenimiento del sistema EGNOS, en virtud de la relación contractual que mantiene con la GSA. ESSP está certificada como proveedor de servicios de navegación aérea, en el ámbito CNS.
- Agencia europea GNSS (GSA): por delegación de la Comisión Europea es el organismo encargado de las tareas relacionadas con las fases de explotación del sistema, y en general del programa de gestión operacional de EGNOS y de las decisiones relativas a la explotación del sistema, su evolución y la promoción de aplicaciones y servicios.
- La Organización de los Servicios de Navegación Aérea Civil (CANSO): engloba las compañías que proporcionan servicios de control de tráfico aéreo, y representa los intereses de los ANSP a nivel mundial.
- Aeropuertos o gestores aeroportuarios: son entidades públicas o privadas que gestionan las infraestructuras necesarias para las operaciones de despegue y aterrizaje de aeronaves y todos los servicios asociados para el transporte aéreo comercial y general.
- Operadores y compañías aéreas: se agrupan en asociaciones, como IATA (Asociación Internacional para el Transporte Aéreo), EBAA (Asociación Europea de Aviación de Negocios), ERAA (Asociación de Compañías de la

Regiones Europeas), AOPA (Asociación de Pilotos y Propietarios de Aeronaves) y otras alianzas.

- Fabricantes de aeronaves y de su equipamiento, que incluye también a las empresas del mercado encargadas de la fabricación de los receptores GNSS

La Ilustración 21 muestra la relación entre los diferentes partes que intervienen en el servicio.

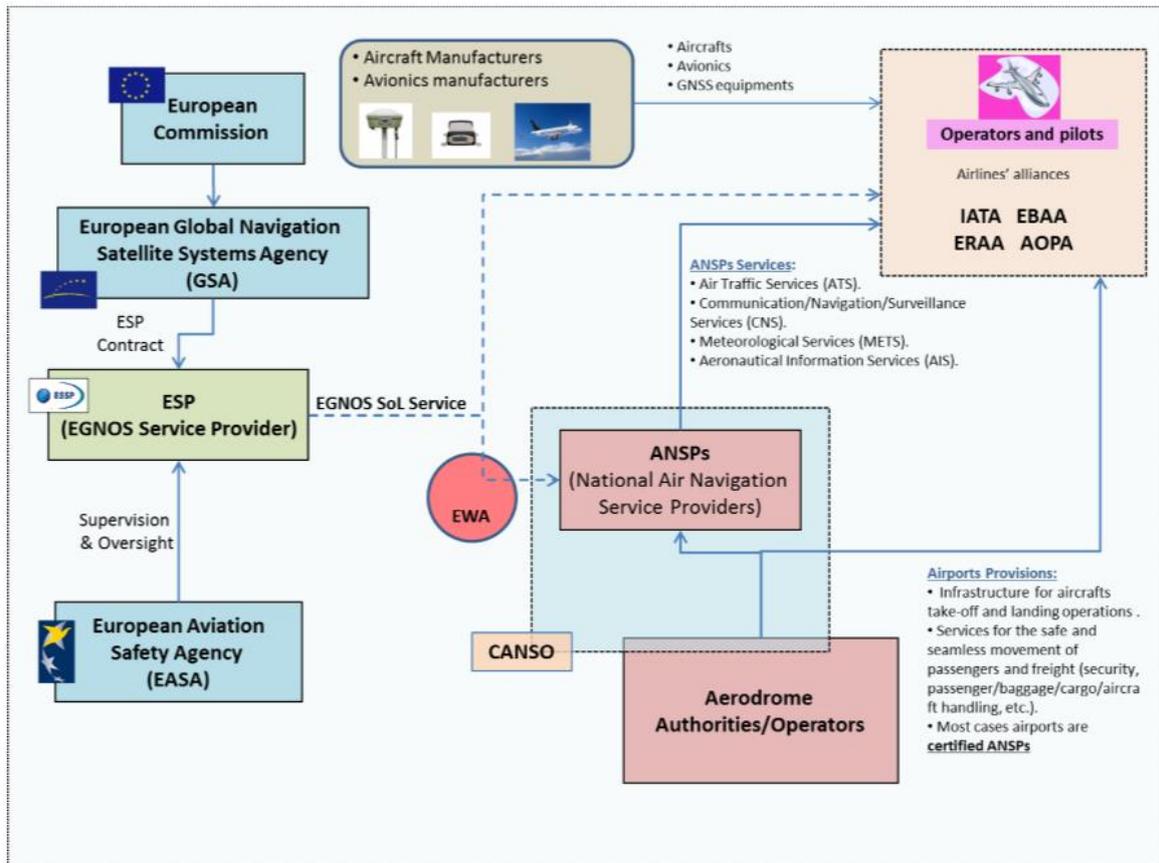


Ilustración 21. Actores implicados en la provisión del servicio EGNOS SoL [Ref.26]

3.1.3 Niveles del servicio EGNOS SoL

Para proporcionar el servicio crítico de navegación SoL, el sistema EGNOS se ha diseñado para que su señal en el espacio SIS cumpla con los requisitos de la OACI [Ref.9] y pueda ser usado en todas las fases de vuelo: en ruta, área terminal (salidas y llegadas) y procedimientos instrumentales de aproximación.

Los procedimientos de vuelo por instrumentos (IFP) son maniobras predeterminadas realizadas por referencia a los instrumentos de a bordo, lo que implica que no necesariamente debe existir contacto visual con el terreno. En el caso de los procedimientos instrumentales de aproximación se garantiza protección frente a obstáculos desde el punto en que se inicia la aproximación hasta un punto a partir del cual la aproximación puede ser completada mediante aterrizaje visual, o si este no

puede completarse, hasta una posición en la cual se aplican los criterios de circuito de espera o de margen de franqueamiento de obstáculos en ruta.

Los diferentes niveles de servicio definidos para los procedimientos instrumentales de aproximación [Ref.7] cuando se emplea EGNOS, son:

- NPA (aproximaciones de no precisión): cuentan solo con guiado lateral, y conducen a la aeronave hasta mínimos denominados LP (prestaciones de localizador) cuando están apoyadas en sistemas GPS+SBAS. Estas aproximaciones 2D de tipo A, según la clasificación de las aproximaciones de la OACI, pueden estar soportadas por otras especificaciones de navegación PBN diferentes de la RNP APCH, que se emplean también para otras fases de vuelo.
- APV-I (aproximaciones con guiado vertical): cuentan con guiado lateral y vertical basado en GPS+SBAS y conducen a la aeronave hasta el mínimo LPV (prestaciones de localizador con guiado vertical), soportadas por la especificación RNP APCH. En estas aproximaciones, clasificadas como 3D tipo A, la altura de decisión (DH, *decision height*) alcanzable es de hasta 250 ft, de acuerdo con los requerimientos de prestaciones definidos por la OACI [Ref.9].
- LPV-200 (aproximaciones de precisión): son operaciones 3D tipo A o B con guiado lateral y vertical basado en GPS+SBAS, soportadas por la especificación RNP APCH hasta el mínimo LPV y una DH de hasta 200 ft, en cumplimiento con los requerimientos de prestaciones definidos por la OACI [Ref.9]. Se trata de operaciones SBAS CAT I, similares a la CAT I de las aproximaciones de precisión basadas en ILS.

Señalar que el usuario no puede elegir entre los diferentes niveles de servicio, pues la aviónica del receptor emplea una única señal disponible, y monitoriza el rendimiento de acuerdo a los requisitos mínimos establecidos para el tipo de operación.

La Tabla 5 muestra los niveles de servicio que ofrece EGNOS SoL para las diferentes especificaciones y tipos de operación permitidas.

DOMAIN	USER OPERATION	EGNOS SoL Service Levels										
		NPA							APV-I	LPV-200		
AVIATION	Performance Requirements Annex 10 - Vol I - Chapter 3 Table 3.7.2.4-1:	PBN Navigation Specification										
		RNAV 10 **	RNAV 5*	RNAV 2*	RNAV 1*	RNP 4 **	RNP 2*	RNP 1*	RNP 0.3	RNP APCH* down to LPV minima as low as 250 ft.	RNP APCH* down to LPV minima as low as 200 ft.	
		- En-route	X	X	X	X	X	X		X		
		- En-route		X	X	X			X	X		
		- Terminal										
		- Initial Approach										
		- Intermediate Approach										
		- Non-precision Approach (NPA)				X			X	X		
		- Departure										
		- Approach Operations with vertical guidance (APV-I)									X	
- Category I precision approach										X		

Tabla 5. Niveles de servicio EGNOS SoL frente a especificaciones de navegación [Ref.7]

La cobertura de EGNOS da servicio a las regiones de información de vuelo FIR (*Flight Information Region*) bajo la responsabilidad de los estados miembros de la ECAC (*European Civil Aviation Conference*). Dentro del área ECAC, EGNOS es el único sistema de navegación que da soporte a procedimientos RNP APCH hasta mínimos LPV.

3.1.4 Prestaciones del servicio EGNOS SoL

Los objetivos en términos de prestaciones para las aplicaciones aeronáuticas se caracterizan generalmente por cuatro parámetros principales que definen el servicio:

- Exactitud: es la diferencia entre la posición estimada por el sistema y la posición real. Para una determinada posición estimada, la probabilidad de que el error en el posicionamiento esté dentro de los márgenes de exactitud establecidos debe ser de al menos el 95%.
- Integridad: es la medida de la confianza en la corrección de la información suministrada por el sistema. Es la capacidad del sistema de alertar en tiempo y forma a los usuarios cuando el sistema no debe ser utilizado para la operación o fase de vuelo prevista.

- Disponibilidad: se caracteriza por el porcentaje de tiempo en el que se presenta información de navegación fiable a la tripulación, piloto automático u otros sistemas de gestión de vuelo de la aeronave.
- Continuidad: es la capacidad del sistema para realizar su función sin que se produzcan interrupciones no programadas durante la operación prevista. Se relaciona con la capacidad del sistema de navegación para proporcionar una salida con una exactitud e integridad especificadas durante un determinado procedimiento, entendiendo que este se encontraba disponible al inicio de la operación.

Los valores de estos parámetros varían para cada fase de vuelo concreta. En la Tabla 6 se muestran los requisitos establecidos por la OACI para las distintas fases de vuelo, que constituyen una mejora en las prestaciones de los sistemas de cobertura global, especialmente para las aproximaciones de precisión.

Typical operation	Accuracy		Integrity				Continuity	Availability
	Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)	Horizontal Alert Limit (HAL)	Vertical Alert Limit (VAL)		
En-route (oceanic/ continental low density)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7} / h$	5 min	7.4 km (4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4} / h$ to $1 - 1 \times 10^{-5} / h$	0.99 to 0.99999
En-route (continental)					3.7 km (2 NM)	N/A		
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7} / h$	15 s	1.85 km (1 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4} / h$ 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	556 m (0.3 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4} / h$ 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	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	$1 - 8 \times 10^{-8}$ 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	40 m (130 ft)	35.0 m to 10.0 m (115 ft to 33ft)	$1 - 8 \times 10^{-8}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Tabla 6. Prestaciones requeridas establecidas por OACI [Ref.7]

Los requisitos de la aviación civil son de los más exigentes entre los diferentes tipos de usuarios de EGNOS, especialmente en términos de integridad y continuidad.

Las prestaciones que ofrece el servicio SoL de EGNOS se resumen en la Tabla 7.

		Accuracy		Integrity		Continuity	Availability
		Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)		
Performance	NPA	220 m	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7} / h$	Less than 6 seconds	<1 – 1×10^{-5} per hour in most of ECAC <1 – 2.5×10^{-5} per hour in other areas of ECAC	0.999 in all ECAC
	APV-I & LPV200 ¹⁵	3 m ¹⁵	4 m ¹⁵	$1 - 2 \times 10^{-7} / \text{approach}$		<1 – 1×10^{-4} per 15 seconds in the core of ECAC $1 - 5 \times 10^{-4}$ per 15 seconds in most of ECAC landmasses	0.99 in most of ECAC landmasses

Tabla 7. Prestaciones EGNOS SoL [Ref.7]

EGNOS puede emplearse como soporte en todas las fases de vuelo. Sin embargo, las aplicaciones más exigentes y para las que ofrece mejores prestaciones en cuanto a requisitos de exactitud en el posicionamiento e integridad son las aproximaciones con guiado vertical (APV-I y LPV-200).

En el Anexo B se incluyen las prestaciones conseguidas por el sistema EGNOS en el caso de las aproximaciones con guiado vertical, según los datos disponibles para el primer trimestre de 2020.

3.2 Estado actual de implantación de procedimientos RNP APCH (mínimos LPV)

En la actualidad el proceso de implantación de procedimientos RNP APCH en Europa está regulado por el Reglamento de ejecución (UE) 2018/1048 de la Comisión [Ref.29], por el que se establecen requisitos de utilización del espacio aéreo y los procedimientos operativos en relación con la navegación basada en la performance, se fomenta el uso de la PBN, mediante el empleo de EGNOS para el establecimiento de operaciones de aproximación con mínimos LPV, en aras de mejorar la seguridad y la relación coste-eficacia del sistema de navegación aérea.

Los principales hitos que establece dicho Reglamento en relación con la implantación de procedimientos de aproximación con guiado vertical son:

- La implantación, antes del 3 de diciembre de 2020, de aproximaciones RNP APCH con guiado vertical (LPV) en todas las cabeceras de pista de no precisión, es decir, que no dispongan de procedimientos de aproximación de precisión publicados.
- Implantación, antes del 25 de enero de 2024, en todas las cabeceras de pista que ya disponen de aproximaciones de precisión publicadas, de procedimientos de aproximación de conformidad con los requisitos de la especificación de aproximación RNP APCH, incluidos los mínimos LNAV, LNAV/VNAV y LPV.

Los aeropuertos bajo el ámbito del Reglamento son los aeropuertos EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea), que cumplan las tres condiciones siguientes establecidas en el Artículo 2 del Reglamento (UE) 2018/1139 [Ref.30]:

- se encuentran abiertos para uso público
- prestan servicio al transporte aéreo comercial, y
- tienen una pista pavimentada instrumental de 800 metros o más, o se utilizan exclusivamente para helicópteros que utilicen procedimientos de aproximación o de salida por instrumentos.

3.2.1 Implantación en Europa

En el caso de las maniobras de aproximación PBN, el estado actual de implantación en Europa puede observarse en la Ilustración 22, en donde los puntos verdes señalan aeropuertos con implantación completa, los azules aeropuertos con implantación parcial, y los naranjas son aeropuertos en los que está prevista la implantación de estos procedimientos.



Ilustración 22. Estado de implantación de procedimientos RNP APCH en Europa [Ref.32]

Los datos numéricos a fecha 30/04/20 [Ref.32] son los indicados en la Tabla 8.

Procedimientos de aproximación	Nº Cabeceras de pistas cubiertas	% Cabeceras de pistas cubiertas	Nº Aeropuertos parcial/totalmente cubiertos	% Aeropuertos parcial/totalmente cubiertos
LPV (APV 1)	340	21.51 %	206	27 %
LPV (Cat 1)	258	16.32 %	144	18.87 %
TOTAL LPV	598	37.8 %	324	42.5 %

Tabla 8. Procedimientos LPV implantados en Europa [Ref.32]

El número de procedimientos implantados en la totalidad de los aeropuertos de Europa es de 598 de un total de 1581 cabeceras de pista, lo que supone un 37,8% del total.

En la Tabla 9 y la Ilustración 23 puede verse la evolución de los procedimientos implantados frente a los planificados en el periodo temporal 2015-2025, de forma gráfica y numérica, respectivamente, considerando únicamente los aeropuertos bajo el ámbito de EASA.

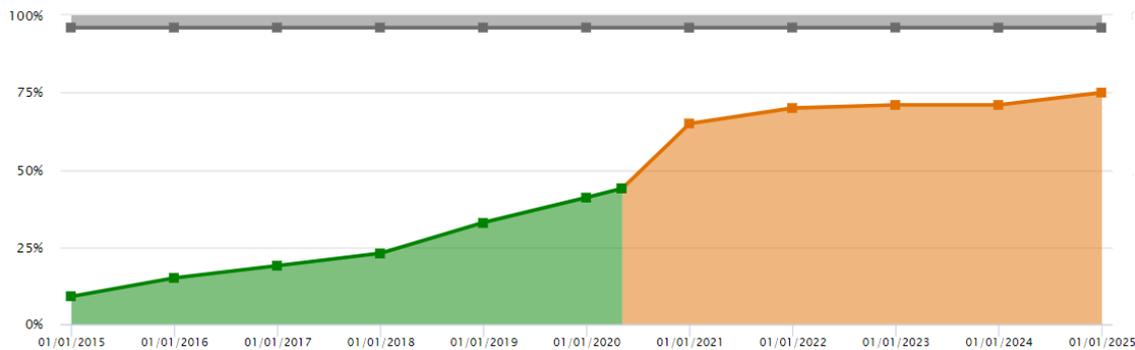


Ilustración 23. Procedimientos LPV implantados/previstos en Europa [Ref.32]

Year	Implemented Nb.	Implemented %	Planned Nb.	Planned %
01/01/2015	93	9.309	686	68.669
01/01/2016	150	15.015	629	62.963
01/01/2017	186	18.619	593	59.359
01/01/2018	234	23.423	545	54.555
01/01/2019	329	32.933	450	45.045
01/01/2020	412	41.241	367	36.737
01/01/2021	651	65.165	128	12.813
01/01/2022	698	69.87	81	8.108
01/01/2023	709	70.971	70	7.007
01/01/2024	713	71.371	66	6.607
01/01/2025	746	74.675	33	3.303

Tabla 9. Procedimientos LPV implantados/previstos en Europa [Ref.32]

Además, hay un total de 42 cabeceras de pista en las que no es viable la implantación de este tipo de procedimientos, esto es, un 4,2% de total.

3.2.2 Implantación en España

En España, con carácter general, se han publicado procedimientos RNP APCH, para los tres mínimos LNAV, LNAV/VNAV y LPV. En la Ilustración 24 se representan los aeropuertos en los que se han implementado estos procedimientos en todas sus pistas en color verde, aquellos que en los que se ha llevado a cabo una implantación parcial en color azul y los que se encuentran planificados en los próximos años en color naranja.



Ilustración 24. Estado de implantación de procedimientos RNP APCH en España [Ref.32]

Fijándonos únicamente en las aproximaciones LPV basadas en EGNOS, y considerando únicamente los aeropuertos bajo el ámbito de la EASA, en España existen un total de 12 procedimientos implantados de un total de 79 cabeceras de pista, a fecha 30/04/20, lo que supone un 15,19%.

Los aeropuertos en los que se ha conseguido llevar a cabo la implantación de procedimientos PBN son los siguientes:

- Santander (LEXJ): mínimos LPV implantados en 2013 a ambas cabeceras de pista.
- Almería (LEAM): mínimos LPV implantados en 2017 a ambas cabeceras de pista.

- Fuerteventura (GCFV): implantación en 2018, sin mínimos LPV, debido a la falta de prestaciones EGNOS adecuadas en el momento de su implantación (previsto implantar a futuro)
- Valencia (LEVC): mínimos LPV implantados en 2018 a ambas cabeceras de pista.
- Palma de Mallorca (LEPA): implantación en 2018, mínimos LPV en todas las cabeceras de pista excepto en la 06R (3 en total), debido a que los aterrizajes en dicha cabecera están restringidos por motivos medioambientales.
- Lanzarote (GCRR): implantación en 2019, mínimos LPV en RWY03
- Vigo (LEVX): mínimos LPV implantados en 2019 a ambas cabeceras

Todos los procedimientos implantados hasta el momento han sido del tipo APV-I, no existiendo en la actualidad ningún procedimiento de aproximación basado en el nivel de servicio LPV-200 de EGNOS, si bien se encuentran diseñados en algún caso y están previstos en un futuro próximo.

En la Ilustración 25 y la Tabla 10 puede verse la evolución de los procedimientos implantados frente a los planificados en el periodo temporal 2015-2025, de forma gráfica y numérica, respectivamente.

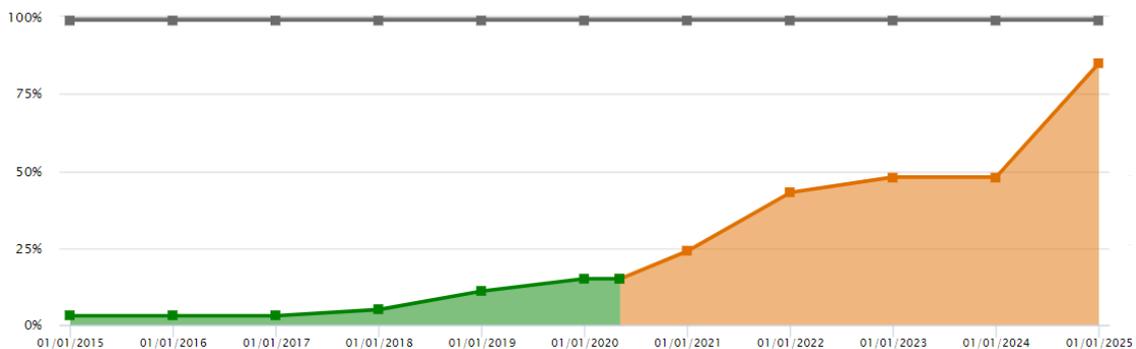


Ilustración 25. Procedimientos LPV implantados/previstos en España [Ref.32]

Year	Implemented Nb.	Implemented %	Planned Nb.	Planned %
01/01/2015	2	2.532	69	87.342
01/01/2016	2	2.532	69	87.342
01/01/2017	2	2.532	69	87.342
01/01/2018	4	5.063	67	84.81
01/01/2019	9	11.392	62	78.481
01/01/2020	12	15.19	59	74.684
01/01/2021	19	24.051	52	65.823
01/01/2022	34	43.038	37	46.835
01/01/2023	38	48.101	33	41.772
01/01/2024	38	48.101	33	41.772

01/01/2025	67	84.81	4	5.063
------------	----	-------	---	-------

Tabla 10. Procedimientos LPV implantados/previstos en España [Ref.32]

Además, se da la situación de que en una de las cabeceras de pista del Aeropuerto de Pamplona la implantación de este tipo de procedimientos no resulta viable, debido a la complejidad orográfica del terreno, lo que supone un 1,3% del total.

3.3 Factores que determinan la implantación de procedimientos RNP APCH (mínimos LPV)

El material guía de OACI para la implantación de operaciones RNP APCH [Ref.27] describe el proceso que debería seguir un ANSP o un gestor aeroportuario que tenga intención de llevar a cabo dicha implantación.

Este documento también proporciona orientación a los operadores aéreos sobre cómo obtener la aprobación operacional para tales operaciones.

De las aproximaciones con guiado vertical, solamente las RNP APCH hasta mínimos LPV están basadas en EGNOS. El guiado vertical es angular y se define en el FAS DB (Final Approach Segment Data Block).

3.3.1 Proceso de implantación

Las actividades necesarias para la implantación están agrupadas en un proceso previo a la implantación, que comprende la toma de decisión para la implantación de RNP APCH, en qué localizaciones y qué tipo de aproximaciones, y un proceso que corresponde propiamente a la implantación y que comprende las actividades siguientes:

- Diseño de procedimientos de vuelo

Los criterios para el diseño de los procedimientos RNP APCH se establecen en los documentos de OACI [Ref.34], y [Ref.35], que además establece requisitos de formación para los diseñadores de procedimientos. Para el diseño de los procedimientos se necesita disponer de un estudio o BBDD actualizado de los obstáculos ubicadas bajo las superficies limitadoras de obstáculos definidas en el Anexo 14 de OACI [Ref.36].

- Validación de beneficios esperados

Una vez conocidos los mínimos obtenidos del diseño de los procedimientos, se estará en condiciones de evaluar los beneficios operacionales que se pretende conseguir.

- Estudio de seguridad local

El estudio de seguridad debe comenzar lo antes posible para que el análisis pueda tenerse en cuenta en el proceso de diseño si fuera necesario y en todo caso de manera previa a la implantación de los cambios. El análisis debe ser aprobado por la autoridad nacional de supervisión, AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) en el caso de España.

- Toma de decisión previa a la implantación

Tras las conclusiones de las actividades anteriores, se toma la decisión para continuar con la implantación.

- Validación de los procedimientos

El diseño de los procedimientos debe someterse a un proceso de validación, cuyo objetivo es verificar todos los datos sobre los obstáculos y la navegación, y evaluar la volabilidad del procedimiento propuesto. La validación normalmente consiste en la validación en tierra y la validación en vuelo.

- Definición del Modo de Operación ATC

El control de tráfico aéreo (ATC) debe definir los procedimientos operativos a emplear, especialmente en el caso de tráfico mixto que opera con navegación convencional y basada en prestaciones simultáneamente.

- Requisitos del servicio de información aeronáutica (AIS)

Las cartas que deben publicarse en la Publicación de Información Aeronáutica (AIP) de cada país incluirán una tabla de valores de OCA/H (altitud/altura de franqueamiento de obstáculos) correspondientes a los tres mínimos LNAV, LNAV/VNAV y LPV. Los procedimientos además se codifican según el estándar de bases de datos de navegación embarcados, ARINC 424, que define un formato de fichero para los datos de navegación que necesitan las aeronaves. En el caso de las aproximaciones LPV, además, los datos a codificar incluyen el FAS Data Block, que contiene los ocho caracteres hexadecimales en el campo 'CRC Reminder' que determinan la integridad de los datos durante su transmisión y almacenamiento, y permiten comprobar que el procedimiento se ha codificado correctamente en las bases de datos de navegación.

- Bases de Datos de navegación

Como se ha comentado, las bases de datos aeronáuticas se cargan de acuerdo con el estándar ARINC 424.

- Formación

Se debe impartir la formación apropiada tanto a los controladores de tráfico aéreo que dan servicio en los aeropuertos donde se implementen procedimientos RNP APCH, como a las tripulaciones de vuelo.

- Revisión final previa a la implantación

Una vez completados los procesos anteriores de forma satisfactoria, se puede promulgar la implantación de los procedimientos y acordar una fecha para su publicación y entrada en vigor.

- Puesta en servicio

Una vez en servicio los procedimientos, deben establecerse mecanismos y procedimientos para la monitorización de las prestaciones y la seguridad, incluyendo la posibilidad de reportar sucesos.

Por último, se definen una serie de actividades posteriores a la implantación, como la obtener los porcentajes de éxito de los procedimientos. Si ocurren sucesos no admisibles durante la operación inicial, deben retirarse los procedimientos y revisarse el modo de operación para establecer medidas de mitigación adecuadas.

La Ilustración 26 representa el mapa completo de actividades que define OACI para la implantación RNP APCH [Ref.27] con sus diferentes etapas.

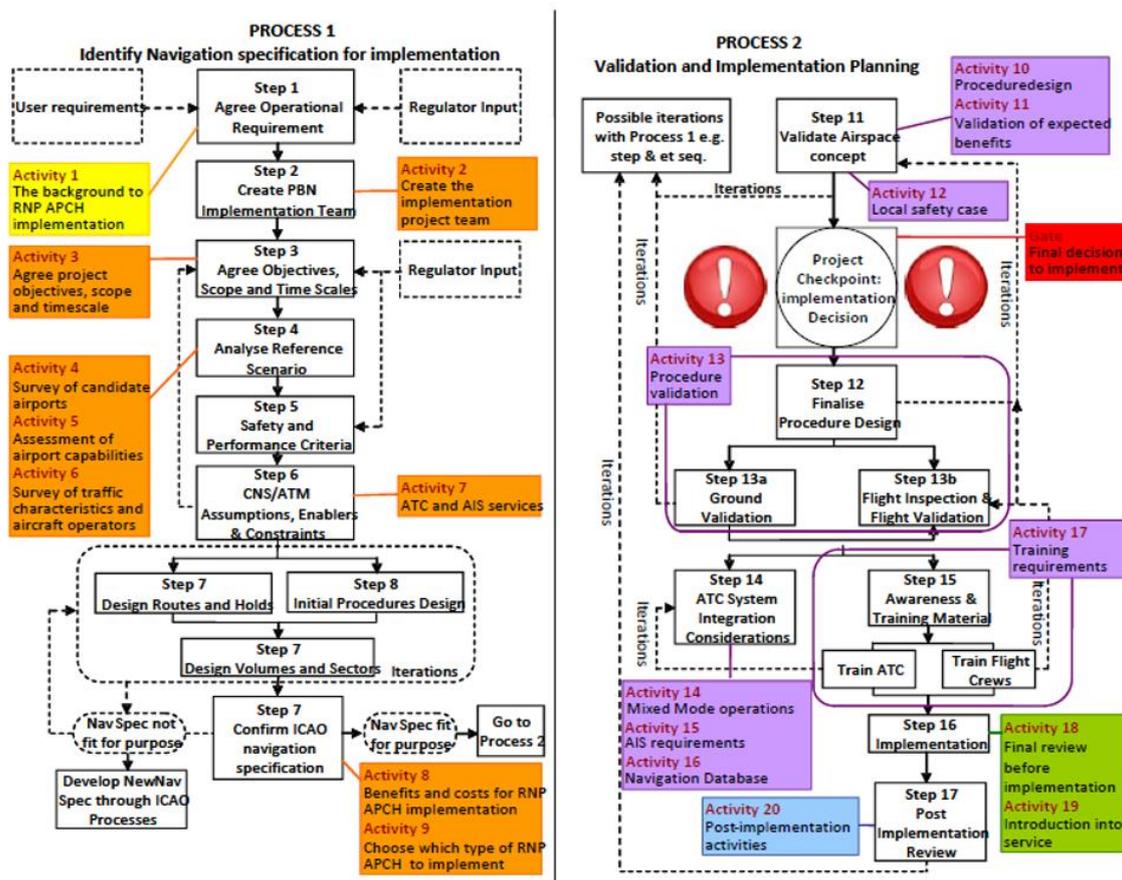


Ilustración 26. Mapa de proceso para la implantación de procedimientos PBN [Ref.27]

3.3.2 Análisis coste-beneficio

Para realizar el análisis de la implantación se empleará como punto de partida la herramienta EBCAST [Ref.2], basada en una metodología [Ref.38] para evaluar y realizar casos de estudio sobre la implantación de operaciones LPV, que puede aplicarse tanto al ámbito de los operadores aéreos como al aeroportuario.

La herramienta sirve como apoyo en la toma de decisión para la implantación de los procedimientos en un determinado aeropuerto/helipuerto o para la inversión en equipamiento adecuado para la flota de un operador. Su objetivo es disponer de criterios de decisión estandarizados, y para obtener resultados lo más fiables posibles, es necesario tener en cuenta datos de costes concretos, datos meteorológicos y de volumen de tráfico.

En el caso del operador aéreo uno de los beneficios esperados es evitar aterrizajes interrumpidos, si bien el mayor beneficio a tener en cuenta en términos de seguridad es el poder evitar las colisiones contra el terreno en vuelo controlado (CFIT, *Controlled Flight into Terrain*). Algunos de los factores que el modelo tiene en cuenta para el caso del operador aéreo son:

- El análisis se basa en una única aeronave y considera el tipo de aviación (general o comercial).
- Si las rutas operadas disponen de operaciones LPV tanto en el origen como en el destino.
- Las horas de vuelo anuales y la duración media por trayecto.
- El porcentaje de eventos DDC (aterrizajes interrumpidos, desvíos o cancelaciones) en los aeropuertos previstos para el aterrizaje (el valor de referencia por defecto (a) considerado es 0,59%) y el porcentaje de estos eventos que potencialmente podrían haberse evitado con el uso de EGNOS (el valor por defecto (b) considerado es de 48,5%).
- El número de aterrizajes por año, y el número de estos en pistas dotadas de procedimientos LPV.
- Para la aviación comercial, se considera el coste medio de los eventos DDC; para la aviación general únicamente el ahorro en combustible y el tiempo perdido.
- En lo relativo al coste asociado a la inversión necesaria se considera el equipamiento (receptor SBAS, antena), la instalación e integración (en el FMS), el entrenamiento de la tripulación, la actualización de documentación en los manuales de operaciones, y la certificación de aeronavegabilidad correspondiente.

En el caso de un escenario de aeropuerto o de un proveedor de servicios de navegación aérea (ANSP), los beneficios y costes asociados a la implantación de procedimientos LPV, no deben mezclarse con los del operador, si bien muchos de los beneficios revierten en él, así como en actividades socioeconómicas (mayor actividad comercial, economía, turismo) de la región en la que se sitúa el aeropuerto.

La metodología que aplica EBCAST no distingue entre el rol ANSP/gestor aeroportuario, si bien en el caso español estos roles están diferenciados y tanto los costes como los beneficios que se obtienen de la implantación de los procedimientos repercuten en cada uno de ellos de forma separada.

En España, la provisión de servicios de navegación aérea recae mayoritariamente en la entidad pública empresarial ENAIRE, que también es la encargada del diseño de los procedimientos de vuelo, mientras que la mayor parte de los aeropuertos españoles son gestionados por la sociedad mercantil estatal Aena.

La propiedad de las infraestructuras de navegación terrestres es de Aena en el caso de los ILS, y los NDB/VOR situados en los recintos aeroportuarios y que dan soporte a las operaciones de aproximación, mientras que las infraestructuras que dan soporte a las operaciones en ruta y área terminal situados fuera de estos recintos son propiedad de ENAIRE.

Por tanto, el coste de la implantación de los procedimientos recae principalmente en ENAIRE, concretamente en lo que respecta a las actividades de diseño de los procedimientos, su validación en tierra y en vuelo, el proceso correspondiente al estudio de seguridad y su aprobación ante la autoridad nacional de supervisión, AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea), así como los aspectos relacionados con la formación del personal ATC y la publicación de los cambios. En algunas ocasiones también es necesario considerar costes derivados de diseñar y publicar otros procedimientos necesarios, tales como llegadas y salidas, o adecuación de los espacios aéreos circundantes. El rango de precios asociados a la inversión necesaria, actualizados a 2020, varía entre los 12.500 € y los 28.000 € por cabecera de pista, para el paquete completo con los tres mínimos LNAV, LNAV/VNAV y LPV.

Sin embargo, el beneficio que supone un aumento de ingresos por las tasas debidas a un mayor volumen de tráfico y por el ahorro en gastos de mantenimiento por la retirada de radioayudas terrestres no necesarias, revierten en ambos, ANSP y gestor aeroportuario.

La mejora en la accesibilidad del aeropuerto, por el hecho de evitar aterrizajes interrumpidos, desvíos y cancelaciones también reporta beneficios al ANSP y al gestor aeroportuario. Sin embargo, estos beneficios también conllevan un valor añadido para toda la cadena del transporte aéreo, como agencias de viajes, servicios aeroportuarios de asistencia en tierra, tiendas y servicios de restauración ubicadas en el interior de los aeropuertos, puesto que aumenta también el flujo de pasajeros. El valor por defecto que se propone, según [Ref.38], para vuelos domésticos es de 712 €/movimiento, actualizado al año 2020. Este valor puede variar en el tiempo y las rutas operadas, diferir según se trate de vuelos regulares o no regulares, y el volumen de pasajeros que transporten, si se trata de aeropuertos principales que son centros conexión de vuelos o aeropuertos secundarios. Este ratio o valor (r) se multiplica por el aumento del número de aterrizajes que se producen por el uso de los procedimientos LPV.

Los valores por defecto para calcular los sucesos DDC (aterrizajes interrumpidos, desvíos o cancelaciones) son los mismos que se emplean en el caso del operador aéreo, comentados anteriormente.

El número de aterrizajes (L) se obtiene a partir de datos estadísticos y previsiones de tráfico anuales, se necesita conocer tanto la previsión de incremento de tráfico, sin considerar los procedimientos LPV, así como una estimación del porcentaje de flota equipada con receptores SBAS que operan en el aeropuerto.

El periodo de tiempo para el análisis recomendado es de 10 años, aunque pueden emplearse otros horizontes temporales, como 20 o 30 años, pues el desmantelamiento de algunas radioayudas solo puede darse tras un periodo de operación largo, por ejemplo, hasta el año 2040.

Para la previsión de tráfico en este periodo, se ha considerado los datos del último informe disponible realizado por Eurocontrol [Ref.40], si bien estos datos tendrán que revisarse para considerar el escenario actual y el impacto en el turismo y el sector aéreo especialmente, y por tanto en el número de movimientos de tráfico, causado por la crisis del coronavirus, y actualizarse en consonancia con la previsión de crecimiento futuro.

Para un año cualquiera, el número de aterrizajes interrumpidos evitados en un aeropuerto se calcula como $0,25 \cdot L \cdot a \cdot b$

Los ahorros conseguidos por el número de aterrizajes interrumpidos evitados se calculan como el producto de la tasa r y el número de estas interrupciones evitadas.

Otra fuente de beneficios se debe al “efecto llamada” que produce un nuevo procedimiento LPV para los operadores en la zona. Por ejemplo, un operador regional podría cambiar sus planes para aterrizar en un aeropuerto principal y hacerlo en un aeródromo más pequeño cercano, con menores tasas aeroportuarias. Estos beneficios son diferentes de los debidos a aterrizajes interrumpidos evitados por el uso de EGNOS respecto al caso de aproximaciones de no precisión o aterrizajes visuales, y se denominan beneficios de accesibilidad de red. Su cálculo se realiza teniendo en cuenta:

- Una estimación del incremento de movimientos debidos únicamente al uso de EGNOS. Este incremento se puede modelar como la previsión de la tasa de crecimiento de tráfico anual. También sería necesario considerar los planes de los operadores para equipar sus flotas con receptores adecuados, para disponer de un análisis más completo.
- Los beneficios anuales consisten en el producto de la ratio (r) de los productores del lado tierra y el número de movimientos adicionales en ese año, considerando todo el tráfico capaz de llevar a cabo operaciones basadas en EGNOS.

Finalmente, es necesario considerar la posibilidad de eliminar de forma gradual las radioayudas de navegación terrestres y el ahorro en costes de mantenimiento de las infraestructuras existentes. Sin embargo, este plan de racionalización debe evaluarse

caso por caso, y puede darse el caso de no existir instalaciones a eliminar. En los casos en los que sí puede aplicarse este supuesto, es necesario evaluar:

- Las instalaciones existentes, su número y tipo (ILS, NDB, VOR, DME). En el caso de EGNOS las infraestructuras candidatas a retirarse son las que dan apoyo a procedimientos de aproximación.
- El horizonte temporal para la racionalización, que debe ser un periodo razonable para que las flotas estén adecuadamente equipadas para los procedimientos basados en EGNOS.
- Valoración del ahorro en coste, para lo que se usan valores estándar de mantenimiento y sustitución de las instalaciones, considerando un tiempo de vida útil de 15 años:
 - o Costes de instalación (CAPEX):
 - DME: 225.000 €
 - ILS: 650.000 € (ILS/DME: 876.000 €)
 - VOR: 677.000 € (VOR/DME: 900.000 €)
 - NDB: 85.000 €
 - o Costes de operación (OPEX):
 - DME: 11.300 €
 - ILS: 32.500 € (ILS/DME: 43.800 €)
 - VOR: 33.900 € (VOR/DME: 45.100 €)
 - NDB: 5.000 €

El beneficio que se obtiene es debido a las radioayudas que se van eliminando gradualmente desde el momento en que se eliminan en adelante, considerando la inversión necesaria que ocasionaría la sustitución de dichas radioayudas. Por ejemplo, con la introducción de procedimientos LPV, en el caso de que se retiraran dos NDBs que dieran soporte a procedimientos de aproximación de no precisión al aeropuerto, y se mantuviera una instalación VOR existente, el beneficio acumulado se obtendría del ahorro en los costes de sustitución (CAPEX) para los dos NDBs más los costes de mantenimiento desde la fecha en que se retiran hasta el final del periodo de análisis.

Por tanto, la metodología para obtener los beneficios de la retirada de radioayudas se basa en la introducción de las cifras de CAPEX y OPEX para las radioayudas seleccionadas y su vida útil esperada, seleccionando el número, tipo de radioayuda y el año de retirada.

Centrando el análisis desde el punto de vista del ANSP/aeropuerto, se ha realizado el análisis con la herramienta EBCAST para tres escenarios diferentes:

- Escenario 1: se trata de un aeropuerto de bajo volumen de tráfico, en tono a 12.000 movimientos anuales, que únicamente disponga de maniobras de aproximación de precisión en una de sus cabeceras y maniobras de no precisión a la otra. Para este caso se ha considerado la implantación de procedimientos LPV únicamente en la cabecera de no precisión, para dotarla de guiado vertical, en el año 2020 de acuerdo con las fechas establecidas por

[Ref.29]. También se considera la retirada de una radioayuda de tipo NDB en un periodo de tiempo posterior (2022), asumiendo la existencia de un procedimiento apoyado en VOR en esta cabecera, que sería el empleado por el tráfico que no tuviera capacidad de navegación PBN.

- Escenario 2: corresponde a un aeropuerto de envergadura media, con un volumen de tráfico en torno a los 70.000 movimientos anuales, con una única pista en la que se dispone de aproximaciones de precisión en ambas cabeceras de pista, soportadas por ILS. En este caso se considera la implantación de procedimientos LPV a ambas cabeceras de pista en el año 2022 y dos casos diferentes sobre la retirada de radioayudas, considerando que se dispone de los procedimientos ILS alternativos. En el primer caso, se considera la retirada de dos instalaciones, una de tipo NDB y otra VOR, en diferentes momentos temporales. En el segundo caso, solo se considera la retirada de un único NDB.
- Escenario 3: corresponde a un aeropuerto de gran volumen de tráfico, con más de 200.000 operaciones anuales, para el que se considera una operación con 2 pistas. Este tipo de aeropuertos generalmente disponen de procedimientos ILS en cada una de sus cabeceras de pista, además de procedimientos de no precisión basados en VOR o NDB como back-up de los procedimientos ILS. Se considera una implantación de LPV en todas las cabeceras en 2023, según [Ref.29], y la retirada de dos instalaciones, NDB y VOR.

A título informativo, se incluyen a continuación los datos de tráfico (salidas y llegadas) de varios aeropuertos españoles, según datos de Aena para el año 2019 [Ref.41].



Ilustración 27. Datos de tráfico de aeropuertos españoles en 2019 [Ref.41]

En cuanto a los datos de tráfico equipado para llevar a cabo este tipo de operaciones, se ha considerado un aumento gradual del mismo de forma que en el año 2030 se alcance alrededor de un 80% de flota equipada, en línea con lo que establece la normativa europea para dicho horizonte temporal.

Como se ha comentado, en todos los casos se considera que es viable la retirada a corto/medio plazo de alguna de las radioayudas en las que se apoyan los procedimientos de aproximación de no precisión, y que su retirada no supondrá un efecto negativo en la operatividad del aeropuerto al que presten el servicio.

Los resultados obtenidos con la herramienta EBCAST para cada uno de estos escenarios pueden consultarse en el Anexo C.

A la vista de dichos resultados, se concluye que, para todos los casos analizados, la implantación de los procedimientos con guiado vertical hasta mínimos LPV resulta económicamente viable siempre y cuando sea posible la retirada de alguna radioayuda en el entorno del aeropuerto, que de soporte a aproximaciones de no precisión al aeropuerto. La existencia de estas radioayudas es común en los aeropuertos para apoyar a los procedimientos alternativos en caso de fallo o indisponibilidad de las instalaciones de tipo ILS, o que exista redundancia de equipos NDB y/o VOR en aeropuertos que solo cuentan con aproximaciones instrumentales de no precisión.

El tiempo necesario para recuperar la inversión llevada a cabo para la implantación de los procedimientos está asociado al tiempo que transcurre entre la implantación y el momento en que se produce el desmantelamiento de alguna de las radioayudas consideradas, considerando la finalización de su vida útil. En función del número de procedimientos implantados, podría ser suficiente con el desmantelamiento de una o dos instalaciones, según el tipo, pues el ahorro en los costes de instalación y de mantenimiento varían en función del tipo de radioyuda del que se trate, según se ha indicado con anterioridad.

En España, la infraestructura actual de radioayudas terrestres para la navegación aérea, según AIP [Ref.25], se compone de 75 VOR, 53 NDB/LOCATOR, 129 DMEs, 49 ILS. De estas, inicialmente se identifican 14 instalaciones de tipo NDB/L que podrían retirarse a corto plazo con cierta facilidad, es decir, un 25% del total de los instalados.

El objetivo a medio-largo plazo debe ser mantener una red mínima de radioayudas de navegación terrestres que proporcionen servicio a aquellos operadores que no puedan realizar operaciones PBN, y que de soporte ante situaciones de contingencia de la red satelital. Para ello, se propone como objetivos:

- La retirada de las instalaciones de tipo NDB, que no dan soporte a operaciones PBN, ni está previsto que den soporte a los procedimientos de contingencia convencionales, excepto cuando no se disponga de otra alternativa por

restricciones en las flotas de los operadores, los condicionantes del entorno, u otras limitaciones de seguridad o financieras.

- La retirada de las instalaciones de tipo VOR hasta un cierto número que permita dar soporte a una red operacional mínima a la que se pueda revertir en caso de contingencia y que pueda dar servicio a aeronaves que no tengan capacidad de navegación PBN hasta el periodo de transición fijado hasta 2030.
- La optimización de la red de DMEs, que podría aumentar en número puesto que dicha infraestructura da servicio a la navegación de área (RNAV) como back-up del sistema GNSS cuando éste no está disponible.
- La retirada de instalaciones ILS CAT I, únicamente en escenarios donde se haya publicado procedimientos basados en SBAS y en GBAS.

3.4 Ventajas e inconvenientes del uso de EGNOS en operaciones aeronáuticas

3.4.1 Ventajas del uso de EGNOS

Las mejoras que ofrece el servicio SoL de EGNOS en cuanto a precisión vertical e integridad, se traducen en ventajas en términos de accesibilidad, eficiencia y seguridad de los operadores, pilotos y los aeropuertos del ámbito geográfico europeo.

Accesibilidad: las mejoras en la exactitud y la integridad se traducen en una reducción de los mínimos de operación (alturas de decisión (DH, *decision height*)), que podrían llegar hasta los 250 ft o los 200 ft en el caso de LPV-200, dependiendo de la orografía y otros condicionantes locales. Así, la implantación de procedimientos basados en el uso de EGNOS mejora la accesibilidad en aeropuertos ante condiciones meteorológicas adversas, e incluso hace posible la aproximación a pistas previamente inaccesibles debido a la presencia de obstáculos locales. Por tanto, la publicación de procedimientos EGNOS ofrece a los aeropuertos una ventaja competitiva sobre aquellos que solo disponen de procedimientos de aproximación de no precisión (NPA, *Non Precision Approach*).

Sostenibilidad: en muchos casos EGNOS mitiga el impacto medioambiental del tránsito aéreo, al permitir aproximaciones en descenso continuo y con trayectorias curvas. Esto reduce tanto el impacto acústico como las emisiones atmosféricas.

Eficiencia: EGNOS proporciona una alternativa efectiva en términos de coste al sistema ILS CAT I, ofreciendo prestaciones similares sin necesidad de los costes de instalación de la infraestructura terrestre y su mantenimiento, y sin depender de la disponibilidad de la instalación. El hecho de permitir alturas de decisión más bajas permite disminuir también los costes asociados a demoras, desvíos a los aeropuertos alternativos y cancelaciones de vuelos. Su implantación permitiría prescindir del uso de radioayudas para la navegación terrestre y de los costes asociados a su instalación y mantenimiento.

Todo ello es posible, disponiendo a bordo de un receptor EGNOS certificado, un entrenamiento adecuado de la tripulación de vuelo, el diseño de los procedimientos de aproximación al escenario concreto y adaptando las funciones correspondientes de los sistemas de gestión de vuelo (FMS, *Flight Management System*) incorporada en la aviónica de las aeronaves.

Seguridad: el aumento de la exactitud vertical que proporciona EGNOS y el guiado vertical que proporciona hace que las aproximaciones más fáciles de volar, reduciendo la probabilidad de ocurrencia de eventos CFIT (*Controlled Flight into Terrain*) hasta en un 75%. Además, también actúa de back-up de los sistemas de aproximaciones de precisión basados en ayudas convencionales en aquellos aeropuertos que disponen de estos.

Beneficios operacionales: se reduce la dispersión en las trayectorias, el consumo de combustible y la huella de ruido. Permite un uso más flexible del espacio aéreo, las aproximaciones LPV permiten aproximaciones directas en casos en los que no es posible mediante el empleo de aproximaciones de no precisión convencionales (VOR, NDB, LOC) y podrían permitir incluso la eliminación de aproximaciones en circuito.

Gestión y afluencia de tráfico aéreo: se mejora la carga de trabajo del personal ATC (*Air Traffic Controller*) gracias a la disponibilidad de rutas más repetitivas y predecibles y a que facilita la secuenciación del tráfico.

Racionalización de la infraestructura de red para la navegación convencional: las aproximaciones LPV ofrecen mayores beneficios en cabeceras de pista que no disponen de equipamiento ILS. Su implantación favorecerá la retirada de radioayudas convencionales de tipo VOR, NDB o ILS, reduciendo los costes asociados a la instalación/mantenimiento, en consonancia con el equipamiento de las compañías aéreas y sus intereses.

Además, produce un impacto limitado en la aviónica del usuario, pues los receptores SBAS se encuentran disponibles en la actualidad. Dado que el diseño de la señal EGNOS está basado en GPS, un receptor GPS con unas modificaciones mínimas podría recibir sin mayor problema la señal EGNOS. De esta forma, se mejora la disponibilidad gracias a las medidas de rango adicionales proporcionadas por EGNOS, y se pueden emplear las correcciones sin necesidad de invertir en un receptor adicional.

3.4.2 Limitaciones del servicio EGNOS

En la mayor parte de los casos, el sistema EGNOS ofrecerá un servicio SoL con unas prestaciones iguales o mejores a las descritas en el apartado 3.1.4.

No obstante, en determinadas circunstancias, los usuarios pueden experimentar rendimientos por debajo de los valores nominales, si bien ante tales circunstancias, la integridad queda siempre garantizada.

Se listan a continuación los efectos más comunes y las causas que los producen [Ref.7]:

- Retardos en la transmisión: en un sistema SBAS, la recepción de los parámetros necesarios para construir el modelo ionosférico a aplicar por los usuarios puede tardar hasta 5 minutos en recibirse, dependiendo del receptor. Por lo tanto, la exactitud en la precisión no se consigue de manera inmediata.
- Atenuación de la señal: el nivel de potencia recibida para las señales GPS y EGNOS es extremadamente bajo, por lo que si la señal se recibe muy degradada puede producirse inestabilidad en la solución de la posición. En estos entornos el comportamiento mejora si se emplea un diseño de antena y un receptor de alta calidad.
- Pérdida de la señal: la señal operacional de EGNOS se transmite a través de dos satélites geoestacionarios a efectos de asegurar la redundancia necesaria en caso de pérdida de alguno de los enlaces satelitales debido a enmascaramiento, por ejemplo, debido a la orografía local. Este efecto es más común al desplazarse hacia el Norte, a latitudes más elevadas, donde los satélites pueden perderse al quedar por debajo del horizonte del usuario. Si se llega a perder la señal de ambos satélites, el receptor revertirá a un modo de recepción de sólo GPS, con la consecuente degradación en las prestaciones de la señal recibida. No obstante, el sistema EGNOS se ha diseñado para considerar pérdidas temporales de la señal, por lo que este efecto no será instantáneo, aunque el tiempo en que el receptor es capaz de seguir proporcionando una buena exactitud dependerá del diseño del receptor.
- Interferencias locales: aunque las señales GPS y EGNOS emplean una banda de frecuencia protegida por la ITU (International Telecommunication Union) es posible que se produzcan interferencias de transmisiones espurias en las proximidades que afecten a los usuarios aéreos, que pueden experimentar una pérdida de exactitud en la posición o incluso la pérdida del servicio de navegación. La detección, mitigación y control de estas transmisiones interferentes que degradan las prestaciones el servicio corresponde a las autoridades locales.
- Centelleo ionosférico, cuyas perturbaciones más agudas se registran para un trayecto de propagación por debajo de 3GHz, a elevadas latitudes y en zonas subtropicales, y afectan a las señales GPS y EGNOS, pudiendo causar pérdida de estas durante un intervalo corto de tiempo, y provocar una degradación de la exactitud e incluso una pérdida de la posición.
- Degradación de la constelación básica GPS, lo que ocasionaría a su vez degradación en el servicio SoL de EGNOS.

El Reglamento (UE) 2016/1199 [Ref.44] eliminó la aprobación específica para todas las operaciones basadas en PBN que imponía el Reglamento 965/2012, con el fin de aliviar la carga económica y administrativa innecesaria a los operadores de aviación general, al considerarse que se ha alcanzado la experiencia y madurez suficiente con este tipo de operaciones.

En la actualidad el proceso de implantación de procedimientos RNP APCH en Europa está regulado por el Reglamento de ejecución (UE) 2018/1048 de la Comisión [Ref.29], que establece requisitos de utilización del espacio aéreo, los procedimientos operativos en relación con la PBN y promueve el empleo de EGNOS para el establecimiento de operaciones de aproximación con mínimos LPV. Concretamente, establece que se deben implantar estas operaciones de aproximación en todas las cabeceras de no precisión antes del 3 de diciembre de 2020 y en todas las cabeceras de precisión antes del 25 de enero de 2024.

De acuerdo con este reglamento, con carácter general los procedimientos de navegación convencionales o que no cumplan con los requisitos de la navegación basada en las prestaciones, se podrán mantener hasta el 1 de junio de 2030. Después de esta fecha, los proveedores de servicio de navegación aérea conservarán una red de ayudas convencionales de navegación y las infraestructuras de vigilancia y comunicaciones necesarias para garantizar la capacidad de seguir prestando servicios con otros medios cuando, por motivos ajenos a su control, el sistema GNSS u otros métodos empleados para la navegación basada en la performance dejen de estar disponibles. También establece un plazo hasta el 1 de junio de 2030 para continuar prestando servicios por medios distintos de la PBN, lo que facilitará la racionalización de infraestructuras terrestres para la prestación de los servicios, evitando costes innecesarios.

A nivel nacional, la transición a la navegación basada en las prestaciones (PBN) debe estar alineada con la “Política y Marco Estratégico de Referencia para la Implantación en España de la Navegación Basada en las Prestaciones (PBN)” [Ref.33] definida por la Dirección General de Aviación Civil dependiente del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

3.5.2 Financiación

Tanto la Comisión Europea como la GSA a través de ESSP han promovido activamente la extensión del uso de EGNOS en aplicaciones para la aviación, ofreciendo diversos programas de financiación y soporte técnico para los primeros ANSPs y operadores interesados en adoptar su uso.

3.5.3 EGNOS Working Agreement (EWA)

Los ANSP europeos que pretendan implantar operaciones basadas en el uso de EGNOS deben firmar un acuerdo de trabajo (EWA) con el proveedor del servicio EGNOS, ESSP.

El principal objetivo de este acuerdo es formalizar aspectos técnicos y operacionales entre ambas organizaciones, y definir la interfaz operacional para dar un soporte adecuado a la operación basada en EGNOS.

Este acuerdo es un facilitador para la implantación, que ayuda al cumplimiento de la normativa aplicable, proporciona soporte al ANSP que implementa operaciones basadas en EGNOS y sirve como evidencia ante la Autoridad Nacional de Supervisión acerca del marco de trabajo entre ESSP y el ANSP.

4. Estudio de viabilidad sobre el uso de EGNOS en el *cloud*

4.1 Receptores GNSS y compatibilidad con EGNOS

4.1.1 Arquitectura del receptor

Para recibir las señales de EGNOS se necesita un receptor compatible. En el mercado hay gran disponibilidad de receptores procedentes de diferentes fabricantes. Un receptor EGNOS es similar a un receptor GNSS, pero incluye un software especial en su interior que permite al receptor bloquear el código utilizado por los satélites EGNOS y aplica las correcciones EGNOS a la señal GNSS [Ref.45]. Por lo demás, es como un receptor GNSS, que emplea el mismo tipo de antena, por lo que es capaz de recibir también las señales GNSS.

La Ilustración 29 muestra el diagrama de bloques funcional de un receptor típico [Ref.49]:

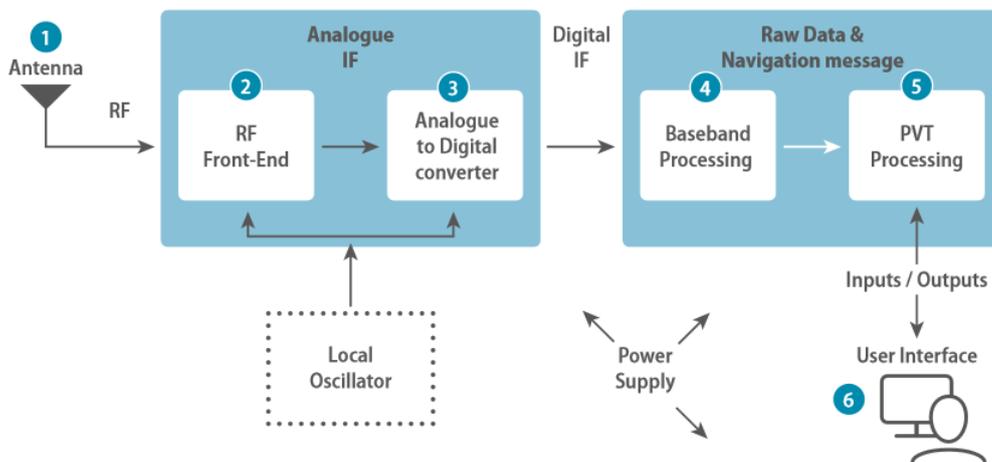


Ilustración 29. Diagrama de bloques de un receptor GNSS [Ref.49]

1. Antena + preamplificador: Recepción de la señal en el espacio SIS en la banda L, amplificación y filtrado.
2. Conversor RF: Conversión a frecuencia intermedia y filtrado de las señales RF
3. Conversor A/D: digitaliza la señal analógica de frecuencia intermedia.
4. Procesado en banda base: realiza las funciones de adquisición y seguimiento de las señales entrantes y la demodulación de los datos de navegación.
5. Calcula la solución de navegación (PVT): la posición estimada, velocidad y el tiempo de offset del usuario relativo al tiempo de referencia empleado. Para poder calcular la solución de navegación es necesario obtener diversas medidas procedentes de varios satélites.

6. Convierte los datos obtenidos a formatos de datos intercambiables estandarizados, y los pone a disposición de los usuarios mediante la interfaz que corresponda (RS-232, Ethernet, Bluetooth, etc.).

La selección del receptor depende de la aplicación concreta, las funcionalidades necesarias y los requisitos de integridad. Para el servicio SoL el equipamiento debe cumplir y estar certificado de acuerdo con los estándares empleados.

En particular, los receptores que se emplean para la aviación civil deben cumplir con exigentes requerimientos establecidos para la navegación aérea y han sido diseñados por la propia comunidad aeronáutica. Los receptores se han diseñado para cumplir con el estándar SBAS *Minimum Operational Performance Standards* (MOPS) [Ref.10]. Este estándar identifica diferentes clases de receptores en función de las operaciones que se pretende llevar a cabo. En [Ref.7], se detallan las diferentes clases de receptores.

El nivel mínimo de prestaciones EGNOS se consigue con un receptor de clase 1, que permite la navegación en las operaciones en ruta, oceánicas y continentales, llegadas y salidas en áreas terminales y aproximaciones de no precisión de tipo LNAV. Con un receptor clase 3, además, se habilita la realización de operaciones de aproximación de tipo LNAV, LNAV/VNAV, LP y LPV.

Con el despliegue de la versión 3 de EGNOS, la próxima generación de receptores tendrán capacidad multi frecuencia y multi constelación, y, por tanto, podrán procesar señales de las constelaciones GNSS GPS y Galileo.

4.1.2 Procesado de la señal

El proceso de recepción de la señal en el receptor del usuario es complejo porque se necesita contar con información de navegación GPS actualizada y las correcciones se han diseñado para minimizar el ancho de banda utilizable.

El receptor EGNOS incluye las siguientes funciones de procesamiento [Ref.16]:

- Procesado de la señal de los satélites GEO (L1 C/A, código y fase), decodificación Viterbi, y demodulación de los datos (datos de navegación de los GEO más correcciones de la señal GNSS)
- Procesamiento del algoritmo para el cálculo de las correcciones ionosféricas usando los datos del mensaje transmitido por los satélites GEO más un algoritmo de interpolación espacial en la ubicación del usuario
- Aplicación de correcciones diferenciales de reloj, efemérides y ionosféricas para la medida de los pseudorángos desde los satélites GPS y GEO
- Procesamiento del algoritmo de mínimos cuadrados ponderado para calcular la posición del usuario

- Procesamiento de los algoritmos de integridad GIC (o VPL, HPL) en base a los datos de los satélites GEO

El receptor realiza una predicción del retardo ionosférico para cada rango en tres etapas [Ref.19]:

- Estima en qué punto el rango satélite/receptor atraviesa la cuadrícula ionosférica
- Realiza una interpolación del retardo vertical en el punto atravesado en base a los puntos de la cuadrícula circundantes
- Por último, aplica el valor obtenido a las medidas de rango

El término σ^2_{UDRE} caracteriza estadísticamente el error de rango residual tras haber aplicado las correcciones de efemérides y reloj, rápidas y lentas.

El término σ^2_{UDRE} se aplica al vector de rango en donde caracteriza estadísticamente los errores ionosféricos residuales. Los errores troposféricos pueden mitigarse usando un modelo sencillo que relaciona la posición del receptor y el número de día dentro del año.

Los receptores EGNOS calculan un límite del error certificado para la solución de la posición en base a los datos transmitidos por los satélites GEO, la geometría usuario/satélite, y la probabilidad de integridad de no detección.

Los receptores que cumplen con el estándar RTCA DO-229D Modificación 1, y sus versiones anteriores, solo realizan búsquedas de códigos PRN en el rango comprendido entre 120-138. Los receptores que cumplen con RTCA DO-229E y versiones siguientes pueden adquirir y seguir señales SBAS en todo el rango de códigos PRN (120-159).

4.1.3 Receptores basados en software

Los receptores GNSS se han implementado tradicionalmente por medio de hardware, como un circuito integrado de aplicación específica (ASIC), diseñado y construido con único propósito de ser un receptor GNSS.

En los receptores basados en software, se emplea para las primeras etapas, el hardware de un receptor convencional para la captación de la señal mediante una antena de RF, la conversión a frecuencia intermedia y la digitalización A/D, mientras que las etapas siguientes, es decir, el procesado digital (adquisición y seguimiento de las señales satelitales disponibles, decodificación del mensaje de navegación, obtención de los observables a través de algoritmos de posicionamiento) y el cálculo de la posición se implementan por software en un microprocesador de propósito general. Se trata de un concepto equivalente a los sistemas de radiocomunicaciones definidos por software (SDR, *Software defined Radio*).

La Ilustración 30 representa el esquema de un receptor convencional en contraposición al receptor software.

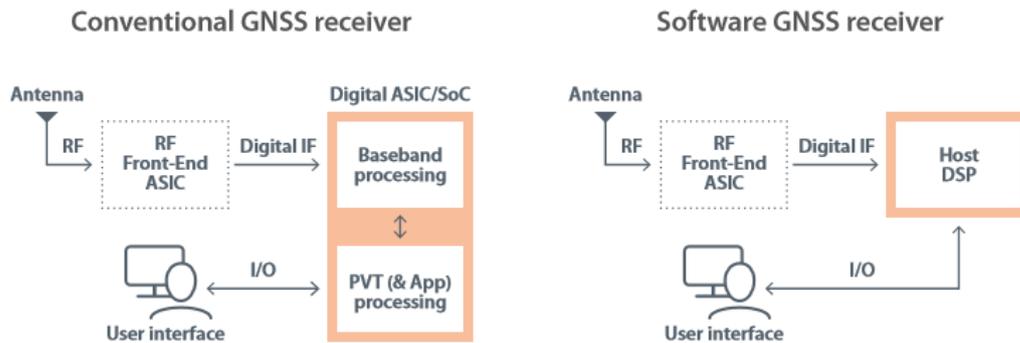


Ilustración 30. Receptor convencional vs receptor software [Ref.48]

Cada una de estas versiones de receptores hardware y software presentan sus ventajas e inconvenientes [Ref.50]:

- Los receptores hardware por lo general son más eficientes en lo referente a carga computacional y consumo de potencia, pues se han diseñado con una alta especialización con la única finalidad de realizar el procesado GNSS.
- Los receptores software permiten mayor flexibilidad, muchas de las características del receptor pueden modificarse a través de software, por lo que puede adaptarse a las necesidades del usuario y a las condiciones de trabajo. También se pueden actualizar fácilmente por software.
- Bajo ciertas circunstancias, los receptores software pueden ser más rentables para determinadas aplicaciones siempre que se disponga de recursos computacionales suficientes, por ejemplo, el microprocesador de un smartphone puede emplearse para calcular la posición GNSS con tan solo incluir un front-end y sin necesidad de ningún costoso hardware adicional.

4.2 Servicio de streaming EDAS (EGNOS Data Access Service)

El servicio EDAS (*EGNOS Data Access Service*) proporciona acceso terrestre a los datos EGNOS, disponibles para usuarios que requieren acceso a tramas específicas de datos GNSS para ofrecer servicios de valor añadido, productos comerciales, investigación y desarrollo, etc. previo registro, a través de Internet. Los datos pueden llegar de esta forma a usuarios que pueden no tener a la vista los satélites EGNOS, como puede ocurrir en escenarios en donde la recepción es complicada, como en entornos urbanos con edificios que obstaculizan la recepción de la señal. En estas situaciones, es posible complementar la recepción mediante la transmisión de la señal EGNOS en tiempo real a través de Internet, y seguir aprovechando las ventajas del sistema independientemente del entorno del usuario.

4.2.1 Arquitectura del servicio EDAS

La descripción del servicio y arquitectura del sistema, que se presenta a continuación, está basada en el documento [Ref.51].

EDAS es un servicio gratuito, aunque solo puede emplearse en aplicaciones que no son críticas para la seguridad, por lo que a priori no podría usarse como método de guiado principal para la navegación aérea, aunque sí podría emplearse como medio auxiliar complementario que sirva de ayuda para operaciones realizadas conforme reglas de vuelo VFR y condiciones meteorológicas de vuelo visual, en los que se requiere de unas determinadas condiciones de visibilidad.

El servicio EDAS comprende la provisión de datos obtenidos, generados y enviados por la infraestructura EGNOS. Si bien las características que definen las prestaciones ofrecidas son de mínimos, los usuarios generalmente pueden experimentar prestaciones mejores.

EDAS ofrece acceso a través de Internet a los mismos datos transmitidos por los satélites GEO de EGNOS en tiempo real y también a datos históricos a través de FTP. El servicio EDAS se encuentra disponible desde el 26 de julio de 2012.

La siguiente figura representa la arquitectura de alto nivel de EDAS.

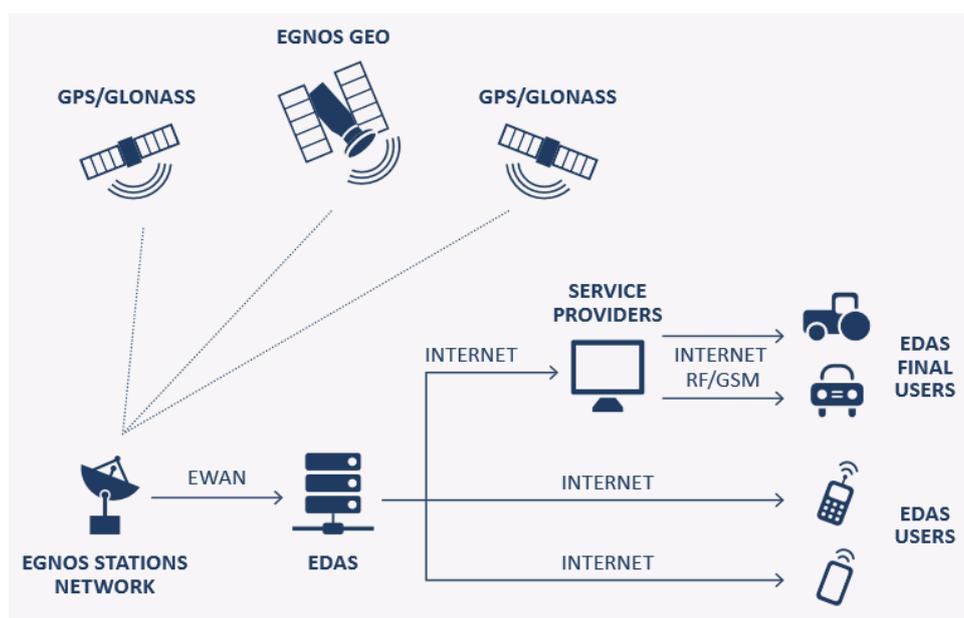


Ilustración 31. Arquitectura de alto nivel de EDAS [Ref.51]

La arquitectura del servicio se compone de dos elementos:

- El sistema EDAS, que implementa la interfaz con la infraestructura EGNOS y lleva a cabo el procesamiento necesario de los datos para proporcionar los diferentes servicios EDAS a través de Internet. Se han definido diferentes estándares para intercambiar los datos en un formato común entre las

diferentes partes interesadas (fabricantes, empresas de software, usuarios finales, investigadores, etc.). Los usuarios se conectan directamente al sistema cuyos servicios están basados en dichos estándares, como FTP, SISNET o NTRIP.

- El cliente SW EDAS, que reside a nivel usuario, e implementa la interfaz externa de algunos de los servicios EDAS. El cliente SW es el responsable de las funciones de seguridad básicas y de la interfaz con el sistema EDAS.

El sistema EDAS se alimenta de los datos EGNOS y proporciona, entre otras, las siguientes funciones:

- Permite la conexión de un alto número de usuarios
- Introduce una capa de seguridad adicional entre el sistema EGNOS y los usuarios finales
- Protege los formatos de datos y protocolos propietarios de EGNOS
- Hace posible definir diferentes niveles de provisión de datos

El cliente SW EDAS es la plataforma independiente que permite la conexión entre los usuarios y el servidor de datos EGNOS. Los usuarios usan el software para obtener los datos EGNOS en tiempo real, procesarlos y proporcionar los servicios a los usuarios finales por medios diferentes a los satélites GEO.

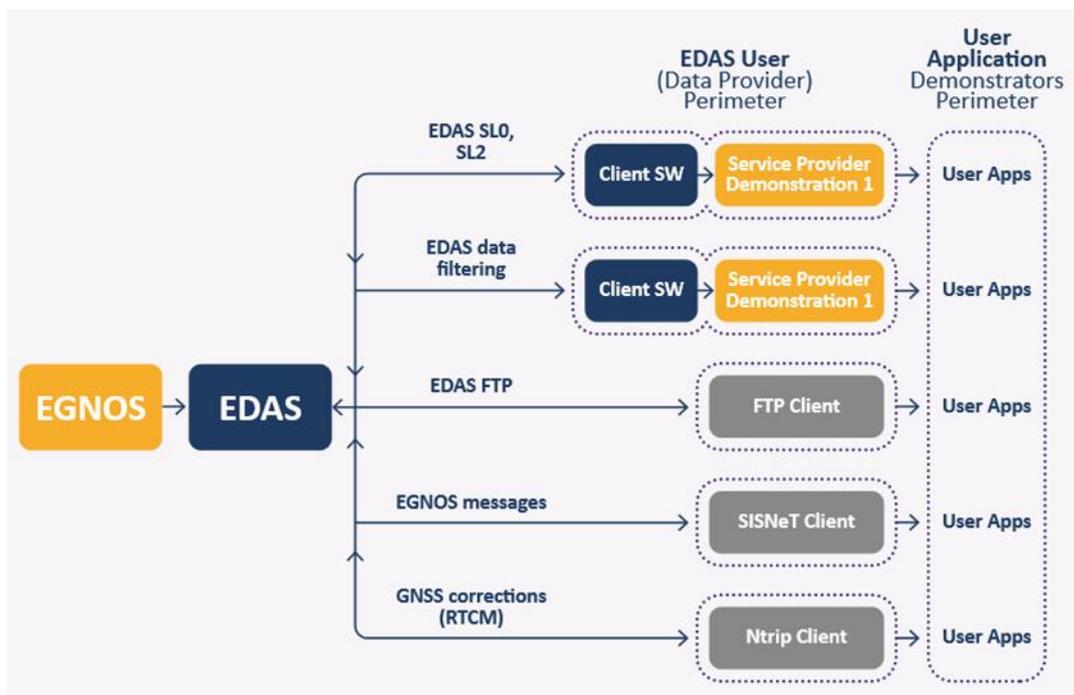


Ilustración 32. Arquitectura del servicio EDAS [Ref.51]

EDAS proporciona principalmente los siguientes tipos de datos:

- Observaciones en crudo de los sistemas GPS, GLONASS y EGNOS, así como los datos de navegación recogidos de la red de estaciones RIMS y NLES.

- Mensajes de aumentación EGNOS, iguales a los recibidos por los usuarios a través de los satélites GEO.
- Correcciones diferenciales GNSS (DGNSS) y mensajes RTK (Real-Time Kinematic) para las estaciones EGNOS, permitiendo a los usuarios implementar técnicas de posicionamiento avanzado.

4.2.2 Servicios que ofrece EDAS

Los **principales niveles de servicio** proporcionados por EDAS son:

- **Nivel 0 (SL0)**, envía a los clientes los datos EGNOS en crudo codificados en formato ASN.1. Se recomienda para aquellos usuarios que deseen transmitir datos en crudo, o transmitirlos en un formato que permita una reconstrucción completa tras la decodificación.
- **Nivel 2 (SL2)**, envía los datos a los clientes en el estándar RTCM 3.1.

Las observaciones en crudo de la red de estaciones RIMS y NLES incluyen datos de las frecuencias L1 y L2 de GPS, L1 de GLONASS y L1 de EGNOS. Para cada par RIMS/NLES y satélite observado se proporciona un conjunto de datos de navegación y observables.

EDAS proporciona datos en tiempo real que se actualizan cada segundo. Cada mensaje contiene un número variable de secciones dependiendo del número de satélites bajo seguimiento.

Los mensajes de aumentación se corresponden con los diferentes tipos de mensajes (MT) transmitidos por la señal EGNOS SIS, que son los mismos que envían los satélites GEO, descritos en el apartado 2.6.

Las estaciones EGNOS se consideran receptores estáticos de referencia, colocados en puntos fijos conocidos. Como las posiciones de los satélites y la localización de la antena de referencia son conocidos, pueden determinarse las distancias. Comparando estas distancias con las obtenidas de las observaciones de los satélites, el error en los pseudorángos puede estimarse de forma precisa, y determinarse las correcciones necesarias. Las correcciones DGNSS se envían a través del servicio Ntrip en formato RTCM 2.1 y RTCM 2.3. EDAS también usa este servicio para proporcionar acceso a las medidas de fase de las estaciones EGNOS y otra información auxiliar para la implementar el posicionamiento RTK, en el formato RTCM 3.1 y también RTC 2.3.

Los requisitos para acceder al servicio EDAS y los datos que se pueden obtener a través de él se definen en [Ref.52].

El **servicio de filtrado de datos** EDAS (EDAS Data Filtering) permite a los usuarios optimizar el ancho de banda necesario aplicando filtros a los datos SL0 y SL2, bien limitando el grupo de estaciones RIMS para la recepción de datos (predefinido por el

proveedor de servicio EDAS), o bien bajando la tasa de envío de datos EDAS de 1 Hz a 1/30 Hz.

El **servicio FTP** de EDAS permite a los usuarios acceder a los datos históricos de EDAS/EGNOS.

El **servicio SISNet** de EDAS proporciona acceso a los mensajes transmitidos por los satélites GEO de EGNOS, a través de Internet y en tiempo real, mediante el protocolo SISNet. Información más detallada sobre SISNet se puede consultar en los documentos [Ref.55] y [Ref.56].

SISNeT proporciona a los usuarios mensajes SBAS de EGNOS, de las efemérides GPS y parámetros ionosféricos, transmitidos como cadenas de texto mediante el protocolo TCP/IP.

Mediante SISNet, un usuario equipado con receptor GPS y con conexión de datos puede acceder a las señales de aumentación de EGNOS y beneficiarse de sus ventajas. Por tanto, permite la recepción y procesamiento de señales EGNOS sin necesidad de invertir en un receptor compatible con EGNOS, requiriendo únicamente un procesador conectado a Internet. El bajo ancho de banda necesario es también otra ventaja. A través de las redes inalámbricas se pueden obtener beneficios relativos a la inicialización del receptor SBAS, permitiendo obtener las correcciones EGNOS de forma más ágil/óptima y reduciendo, por tanto, el tiempo en que el sistema está listo para su uso.

El **servicio Ntrip** de EDAS proporciona datos GNSS en formato RTCM en tiempo real a través de la red EGNOS mediante el protocolo Ntrip (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Este protocolo se ha diseñado para enviar datos de correcciones diferenciales y otros datos GNSS a usuarios estacionarios o móviles a través de Internet. Los detalles para el acceso y uso de este servicio se encuentran disponibles en [Ref.57], [Ref.58], [Ref.59]. También proporciona correcciones GNSS diferenciales (RTCM 2.1, 2.3) y medidas de fase además de mensajes adicionales RTK (RTCM 3.1).

Sobre los rendimientos que ofrece EDAS, mensualmente se publican los valores de disponibilidad y latencia para cada uno de sus servicios. En el Anexo D se incluyen los datos disponibles para el primer trimestre de 2020.

4.3 Despliegue de redes de comunicación 5G

La tecnología 5G constituye el nuevo paradigma de las comunicaciones inalámbricas, y además se considera el componente tecnológico esencial para la transformación digital de la sociedad y la economía en los países más avanzados durante la próxima década [Ref.60].

Las redes de comunicación 5G proporcionarán alta velocidad, baja latencia y conectividad con ancho de banda de alta capacidad. Concretamente, los servicios básicos que define la especificación se pueden agrupar en tres principalmente:

- eMBB (*enhanced mobile broadband*): servicio de ancho de banda mejorada que posibilitará aplicaciones de gran ancho de banda y una latencia moderada
- URLLC (*ultra-reliable low latency communication*): servicios ultra fiables y de muy baja latencia para aplicaciones de misión crítica.
- mMTC (*massive machine type communication*): servicio orientado a proporcionar conectividad masiva de dispositivos, como sensores y dispositivos IoT.

De las categorías básicas definidas por la ITU para la 5G, es la comunicación ultra fiable de baja latencia (URLLC) la característica que puede resultar más prometedora para su empleo en los servicios de navegación aérea. La tasa de datos no se espera que sea muy alta en este tipo de comunicación, pero sí que ofrezca gran movilidad.



Ilustración 33. Servicios básicos de la 5G [Ref.61]

Sin embargo, el despliegue de la red 5G requiere de una evolución de las infraestructuras y las redes de telecomunicación y de inversiones significativas por parte de los operadores. Además, la disponibilidad de sistemas de frecuencia dual, robustos y precisos en el ámbito GNSS será fundamental para el mercado del 5G.

Las redes de 5G se están desplegando con una arquitectura que de soporte a la categoría de servicio URLLC. URLLC dará soporte a una serie de servicios avanzados para dispositivos conectados sensibles a la latencia para habilitar aplicaciones en un amplio espectro, tales como aplicaciones de misión crítica, que tienen requisitos de alta exigencia en términos de su desempeño, su fiabilidad y seguridad.

Los principales beneficios asociados a la URLLC son su gran fiabilidad, alta disponibilidad, baja latencia y mayor seguridad, ofreciendo una gran precisión en la localización.

La tecnología inalámbrica 5G está diseñada para una amplia gama de bandas de espectro y paradigmas reguladores disponibles. Las generaciones anteriores de redes

inalámbricas (como 2G, 3G y 4G) han operado principalmente en bandas de espectro con licencia por debajo de 3 GHz.

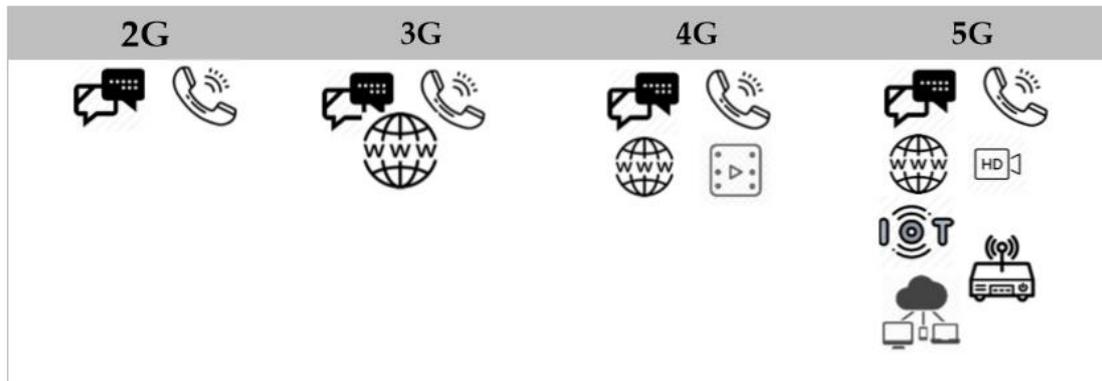


Ilustración 34. Evolución de las redes hasta 5G y servicios asociados [Ref.62]

5G introduce cambios importantes en el uso del espectro, pues su diseño se ha orientado para soportar tanto el espectro con licencia, como el compartido y no licenciado. En términos de bandas, 5G está diseñado para operar en bandas por debajo de 1 GHz y hasta 100 GHz y más.



Ilustración 35. Bandas de frecuencia identificadas para 5G en Europa y posibles casos de uso [Ref.60]

En España, el despliegue de la red 5G se espera que sufra una ralentización debido a la situación provocada por la crisis del coronavirus, pues la licitación de bandas de frecuencias para servicios 5G y la liberalización de la banda de 700 MHz para su empleo por el 5G, que tenía fecha límite para su ejecución el 30/06/2020, ha sido aplazada.

Aunque en la primera fase del despliegue comercial de la 5G los esfuerzos se centran en casos de uso de banda ancha móvil optimizada, el futuro se está preparando para casos de uso que incluirán funcionalidades con características de alta fiabilidad y baja latencia (URLLC).

La QoS es un aspecto importante para la implantación de URLLC, con aplicaciones que requieren movilidad, confiabilidad, seguridad y baja latencia. El 3GPP (3rd Generation Partnership Project) prescribe los objetivos de latencia y fiabilidad para URLLC, estableciendo una latencia de 0.5 ms por enlace y 99.999% de fiabilidad para un paquete de 32 bytes, y 1 ms de latencia en el plano de usuario [Ref.63].

Conseguir estos requisitos para la URLLC es un reto para las redes 5G y requerirá de modificaciones en el diseño del sistema de la actual infraestructura de telecomunicaciones. Algunos de los retos a resolver, especialmente en el enlace descendente, tienen que ver con los requerimientos de fiabilidad para ambos canales de datos y de control, la necesidad de enlaces flexibles y precisos, la reducción del tiempo de procesamiento en la retransmisión de datos, y la multiplexación de URLLC con otro tipo de servicios [Ref.64].

Uno de los factores tecnológicos clave para el cumplimiento de los requerimientos para la implantación de la 5G es el nuevo diseño de la interfaz radio (NR, New Radio), en comparación con LTE, que debe ser capaz de proporcionar una estructura de tramas flexible para soportar los requerimientos de los servicios 5G, dejando margen para un futuro crecimiento tecnológico.

Para el caso concreto de la URLLC los nuevos conceptos de gestión de recursos radio tienen que facilitar la explotación de la capa física con un alto grado de flexibilidad. En particular, se subraya la importancia del empleo de tiempos de transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*) cortos en combinación con mecanismos rápidos de retransmisión HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) que permitan una planificación eficiente del payload crítico en términos de latencia. En este sentido, se resalta una predicción temprana de HARQ para reducir el tiempo de procesamiento durante las retransmisiones y cumplir con el objetivo de latencia de 1 ms. También se señala la importancia de conseguir probabilidades de error bajas tanto para los canales de datos como de control.

En base a este análisis se proponen mejoras en los indicadores de calidad de canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) como la adaptación de los enlaces URLLC de forma más flexible y precisa, el empleo de diversidad de antena avanzada y técnicas de mitigación de interferencias, para conseguir cumplir con los niveles de fiabilidad requeridos.

Aunque la capa física desempeña un papel principal en conseguir los objetivos de latencia y fiabilidad deseados, existen aún, algunas preocupaciones [Ref.62]:

- 1) debe minimizarse la sobrecarga del sistema en el acceso al canal
- 2) la probabilidad de error de paquete también debe minimizarse porque la retransmisión de los paquetes repercute en la latencia

3) la transmisión de paquetes URLLC debe tener prioridad, y transmitirse tan pronto como se generen.

El diseño de los paquetes también es un aspecto clave para la URLLC, pues al conseguir estructuras de trama efectivas se consigue una reducción en el tiempo de procesamiento y de transmisión, y, por tanto, de la latencia del sistema.

Además, la NR debe ser capaz de garantizar los requisitos de movilidad, gestionando los traspasos de forma transparente para el usuario. Se plantean mejoras en la NR para lograr alcanzar traspasos sin interrupciones (*Zero HIT, Handover Interruption Time*) ni fallos (*HOF, Handover Failure*) para URLLC.

El mecanismo de gestión de errores es otro aspecto de mejora, se plantea operar con tiempos TTI más cortos, requiriéndose una respuesta más rápida por parte del equipamiento de usuario para evitar las retransmisiones.

La conformación de haz o beamforming, también influye en el rendimiento extremo a extremo. Por ello, el estándar de 3GPP para NR incluye nuevas características en las capas físicas y de acceso al medio.

5G permite configuraciones diferentes para la red de acceso radio (*RAN, Radio Access Network*): el modo autónomo (*SA, Standalone*), que emplea solo una tecnología de acceso radio, o no autónomo (*NSA, Non-Standalone*), que combina múltiples tecnologías para el acceso.

Las opciones que define el 3GPP para el despliegue de 5G contemplan que el núcleo de la red 5G pueda emplear bien LTE EPC (*Evolved Packet Core*), basado en paquetes y considerado la evolución de las redes existentes, o 5GC (*5G Core*), diseñado en base a una aproximación cloud-native, que emplea técnicas de virtualización y *cloud computing* para el núcleo de la red.

Como se ha visto la 5G desarrolla componentes tecnológicos en diversos dominios o planos: red de acceso radio, transporte, *cloud*, aplicaciones de red y gestión.

En el plano de red, reduce de forma substancial los procedimientos de acceso al canal de comunicación, modifica la estructura de la trama o reduce el tiempo de procesamiento para permitir un acceso prácticamente instantáneo a la red.

Asociado a la flexibilidad que brinda la 5G surge también el concepto de *network slicing* que consiste en segmentar o trocear la red en múltiples redes virtuales, con dimensiones más ajustadas y aisladas entre sí, adaptadas a las particularidades específicas de cada servicio y satisfacer sus requerimientos. Esto permite a un operador ofrecer servicios a los usuarios con diferentes funcionalidades y características empleando una misma infraestructura de red [Ref.65].

Otra característica de la 5G es la flexibilidad que ofrece a la red y las capacidades que introduce de virtualización de recursos activos de la red y de computación en la nube (cloud computing) y el empleo de tecnologías como NFV (*Network Function Virtualisation*) o SDN (*Software Defined Networking*) permiten programar la infraestructura de red para que pueda ofrecer prestaciones en función de las necesidades o requerimientos de determinados servicios.

NFV permite implementar un segmento de red virtualizado de forma que diferentes elementos de la red ejecutan una determinada función dentro de la red. Busca la implementación de servicios y aplicaciones de red sustituyendo dispositivos de HW dedicados y costosos por dispositivos de red basados en SW que se ejecutan en máquinas virtuales con un hardware fácilmente intercambiable y ampliamente disponible en el mercado [Ref.66]. Es la aplicación del *cloud computing* para la provisión de servicios de telecomunicaciones.

SDN permite implementar redes definidas por software siguiendo un modelo centralizado donde se separan a nivel físico las capas de control y de datos, y los elementos de la red se pueden configurar por software. Para ello, emplean software en lugar de dispositivos especializados para el aprovisionamiento y la gestión de los servicios de las aplicaciones y de la red, lo que permite la movilidad y el despliegue de aplicaciones programables, escalables y bajo demanda. SDN supervisa de manera inteligente y adapta automáticamente la red para proveer un mejor servicio en función de las condiciones de cada momento.

Los sistemas *Edge computing* también tienen un papel esencial en las futuras redes para conseguir los exigentes requisitos de la URLLC. Estos sistemas llevan parte de una aplicación o servicio del núcleo hacia un extremo (*Edge*), más próximo a los usuarios y la parte física, para reducir así la latencia.

Numerosos artículos [Ref.67], [Ref.68] sobre sistemas *Edge computing* (ECS), señalan la importancia de la aproximación *cloud-native* en las redes de próxima generación para conseguir alta fiabilidad y baja latencia. Aunque aún existen aspectos que deben resolverse para la implantación de una aproximación basada en sistemas ECS, estos pueden mejorar y proporcionar una mejor QoS para las redes 5G URLLC.

4.4 Empleo de EGNOS basado en *cloud*

La arquitectura de un receptor GNSS basado en la nube o *cloud* se compone de un terminal de usuario que dispone de un front-end de RF que capta la señal, la digitaliza y la envía a través de Internet mediante un módulo de comunicación, según se indica en la Ilustración 36.

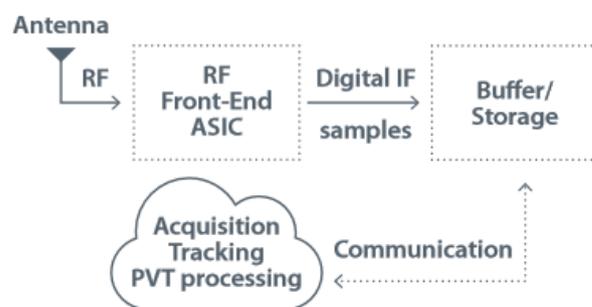


Ilustración 36. Arquitectura de un receptor GNSS basado en *cloud* [Ref.48]

En la actualidad, existen diversos proveedores que ofrecen este tipo de soluciones de computación en la nube o *cloud computing* en el mercado.

En función de cómo se presta el servicio de computación en la nube, se puede distinguir entre tres modalidades [Ref.69]:

- Infraestructura como Servicio (IaaS): se trata de un modelo que pone a disposición de los usuarios una infraestructura formada por servidores, sistemas de almacenamiento, componentes de red y otros dispositivos hardware.
- Plataforma como Servicio (PaaS): en este caso se abastece a los usuarios con una plataforma completa como un sistema operativo y sus servicios asociados a través de la red, sin necesidad de instalación.
- Software como Servicio (SaaS): en este modelo las aplicaciones de software están alojadas en un servidor por un proveedor de servicios, que los pone a disposición de sus usuarios a través de una red, como Internet.

De acuerdo con lo anterior, los servicios que ofrece el *cloud* para los usuarios de EGNOS corresponderían a la categoría de servicio SaaS.

El empleo de los datos de EGNOS basándose en la nube o *cloud* pueden enfocarse desde dos perspectivas distintas:

- Uso de EGNOS en el *cloud*: en este caso la señal EGNOS se capta a través de un *front-end* de RF, junto con el resto de las señales GNSS, para enviar posteriormente las muestras a un servidor remoto en el *cloud* para procesarlas, decodificar el mensaje EGNOS, calcular la posición y proporcionársela al usuario. En este caso el receptor de usuario es un mero *front-end* de RF y todo el cálculo/procesado se lleva a cabo en el *cloud*.
- Uso de EGNOS a través del *cloud*: en este caso la información de EGNOS no se obtiene a través de la señal de RF que envían los satélites sino a través de una conexión de datos (wifi, 4G, 5G, etc.) que se conecta a un servidor remoto desde donde se descarga la información de EGNOS que el propio receptor utilizaría localmente.

Cada una de estas aproximaciones presenta sus propias ventajas y sus inconvenientes, y podrían emplearse de forma combinada para obtener un mayor beneficio las ventajas que ofrece cada una de ellas.

En el caso de la aproximación basada en *cloud*, su ventaja principal radicaría en descargar al receptor de la carga computacional asociada al procesamiento de la señal, lo que permite simplificar los dispositivos. Como contrapartida, para el caso de la señal EGNOS, se plantea el inconveniente de tener que enviar al *cloud* una señal de longitud considerable por radio, lo que puede llegar a suponer un consumo energético mayor que si el procesado de la señal se realiza en el propio receptor. Por tanto, no resultaría útil en términos de eficiencia, a no ser que se empleara una tecnología de ultra bajo consumo que lo hiciera viable. Se plantea como línea de trabajo a futuro estudiar el comportamiento energético de este tipo de receptores empleando diferentes tecnologías para disponer de datos cuantitativos y poder valorar su eficiencia.

En la actualidad el diseño de los receptores GNSS está limitado por dispositivos cada vez menores con necesidades de bajo consumo de potencia, como es el caso de los dispositivos IoT o los drones, a la vez que se trata de reducir la carga computacional en el propio dispositivo.

El enfoque a través del *cloud* presenta como ventaja principal su empleo cuando existen problemas con la recepción de la señal satelital por falta de visibilidad de los satélites o en zonas que no dispongan de cobertura suficiente. También permite mejorar el posicionamiento de los receptores GNSS disponibles en el mercado, al proveerlos de las correcciones y mensajes de integridad que genera EGNOS a través de una conexión de datos. Como inconveniente, añade complejidad al receptor que continúa encargándose del procesado de la señal y el cálculo de la solución de navegación.

La señal de EGNOS no permite el posicionamiento por sí misma, sino que necesita disponer de la información de las señales GNSS y, sobre estas, aplicar las funciones de aumentación e integridad. Estos datos, que generalmente se reciben a través de los satélites geoestacionarios del segmento espacial, también se encuentran a disposición de los usuarios a través del servicio EDAS, a los que se tendría acceso por medio de comunicación inalámbrica desde cualquier ubicación.

La combinación de ambas aproximaciones es la que resulta más ventajosa, pues por una parte se aprovecha la posibilidad de descargar a los receptores de usuario de las tareas computacionales delegándolas en la nube, y, por otra parte, se obtienen los beneficios de un sistema SBAS empleando los datos de EDAS para aplicar las funciones de aumentación e integridad. Este modelo se podría aplicar en dispositivos que no son capaces de implementar las funciones y el procesamiento de un receptor GNSS compatible con EGNOS, de forma que el dispositivo podría limitarse a captar la señal GNSS de RF, y digitalizarla, para posteriormente enviarla al *cloud* para obtener un cálculo de la posición mejorado a partir de datos de EDAS.

En [Ref.3] los autores proponen y analizan una arquitectura basada en *cloud* que calcula de forma centralizada las correcciones e información de integridad que proporciona EGNOS, a través del acceso mediante comunicaciones terrestres como alternativa al acceso estándar a través de la señal SIS. Se trata de una aproximación NaaS (*Navigation as a Service*) en la que una plataforma centralizada basada en *cloud* ofrecería los servicios mejorados de navegación de EGNOS/EDAS a un gran número de dispositivos.

Para acceder al sistema EDAS se necesita un proveedor de servicio que ponga la información a disposición de los usuarios finales. El dispositivo del usuario, además, debe ser capaz de aceptar y elaborar dicha información para poder calcular la posición aumentada y procesar la información de integridad. Por otra parte, debido a la complejidad del algoritmo que calcula y aplica las correcciones, es muy probable encontrar implementaciones subóptimas en los dispositivos de usuario, que conducen a soluciones PVT y cálculos de niveles de protección erróneos, particularmente cuando las aplicaciones no están sujetas a aprobación o certificación.

El modelo de *cloud computing* ofrece la ventaja de tener un alto rendimiento y una arquitectura distribuida a través de un gran número de equipos conectados a ella, ofreciendo diferentes modalidades de servicios a través de Internet, en función de la demanda de los usuarios.

En [Ref.3] se emplea Microsoft Azure como plataforma *cloud* para llevar a cabo las pruebas y comparar las prestaciones en términos de exactitud, disponibilidad e integridad de una solución basada en un receptor EGNOS convencional con una solución basada en *cloud*.

Para ello se emplea un dispositivo con un receptor GNSS compatible con EGNOS que obtendría los datos GNSS en crudo, y un microcontrolador que implementaría la función de aumentación en el propio dispositivo. El dispositivo cuenta con dos modalidades de operación, una primera modalidad en donde recibe la información a través de la señal SIS de EGNOS para procesarla en el propio dispositivo, y otra modalidad en la que envía a través de comunicaciones terrestres los datos GNSS en crudo desde el receptor a la plataforma *cloud*, en donde un módulo de aumentación recibiría los datos EGNOS a través de EDAS, y los almacenaría en remoto para ser usados a demanda para calcular la posición mejorada, devolviendo al dispositivo, como resultado, la solución PVT y los niveles de protección horizontal y vertical.

La arquitectura basada en *cloud* propuesta emplea para el cálculo de la posición los datos de aumentación y de integridad que proporciona el servicio EDAS, mientras que un módulo de aumentación alojado en la nube se ejecutaría para atender las solicitudes de los dispositivos. El diseño del algoritmo empleado para la obtención de la posición mejorada cumple el estándar MOPS de RTCA [Ref.10], si bien dicho estándar no incluye cómo debe recuperarse la información para llevar a cabo la función de aumentación a partir del servicio EDAS. El algoritmo tiene en cuenta un

corto periodo de almacenamiento de datos para poder seleccionar la información necesaria. Una vez recuperada la información válida, se pueden calcular las correcciones y la estimación de errores residuales. Estos valores, combinados con los datos procedentes del receptor, permiten calcular la posición aumentada y los niveles de protección correspondientes.

La arquitectura *cloud* desplegada mediante Microsoft Azure tiene dos funciones principales: recolectar y almacenar los datos de EDAS en formato RTCM para tenerlos disponibles ante solicitudes de los usuarios; y ejecutar la implementación del algoritmo de aumentación haciendo uso de los datos GNSS en crudo y las correcciones almacenadas de los datos EDAS, devolviendo al dispositivo el resultado obtenido.

La comunicación entre el dispositivo de usuario y la aplicación *cloud*, se basa en el servicio HTTP REST, de forma que el dispositivo de usuario envía solicitudes cada segundo a la aplicación *cloud* con los datos en crudo provenientes del receptor GNSS. Por otra parte, el módulo de aumentación residente en el servicio *cloud* emplea como entrada los datos de la solicitud del usuario y la información de EDAS en el estándar RTCM a través del protocolo Ntrip, que soporta acceso a Internet a través de redes IP móviles, calcula la posición PVT y los niveles de protección HPL y VPL y los transmite al dispositivo como respuesta mediante HTTP REST.

En [Ref.70] se plantea una arquitectura muy similar compuesta por tres elementos principales:

- Un servicio de datos SBAS, como EDAS, que proporciona las correcciones SBAS tanto para aplicaciones en tiempo real como para aplicaciones que realicen un tratamiento posterior de los datos a través de un servicio de Internet.
- La aplicación *cloud*, que obtiene datos GNSS en crudo a través del receptor/dispositivo de usuario y del servicio EDAS, y ejecuta el algoritmo de aumentación para obtener soluciones de navegación mejoradas (PVT) y niveles de protección (PL) que definen la región en la cual la solución obtenida tiene validez, y envía esta información al dispositivo de usuario.
- El dispositivo de usuario, que realiza las funciones de un receptor GNSS capaz de proporcionar datos GNSS en crudo a la aplicación *cloud* a través de conexión 3G/5G.

La figura siguiente representa la arquitectura propuesta en [Ref.70].

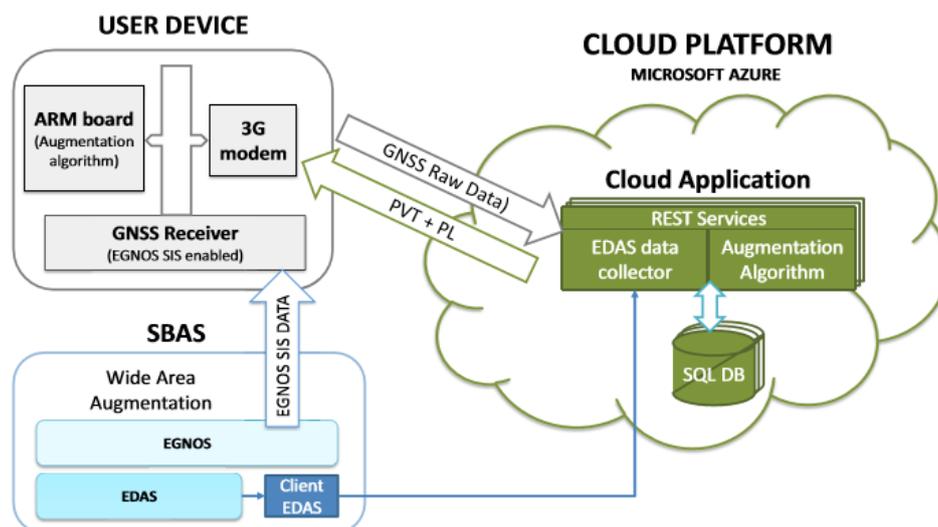


Ilustración 37. Ejemplo arquitectura EGNOS basada en *cloud* [Ref.70]

Las pruebas se realizaron empleando la plataforma *cloud* Microsoft Azure con unas características de procesador dedicado de núcleo único a 1.6 GHz con 1.75 GB de RAM, y una red de datos 3G.

En la evaluación realizada, para comprobar si el sistema propuesto podría emplearse para aplicaciones en tiempo real, se considera como requisito que los resultados de PVT y PL deben recibirse dentro del límite temporal de 1 s. Los resultados obtenidos, en donde se considera la contribución de diferentes componentes al retardo total, en todos los casos se encuentran en tiempos inferiores al umbral de 1 s, alcanzándose, por tanto, el objetivo establecido.

De los resultados obtenidos en cuanto al rendimiento ofrecido por la solución basada en *cloud* en comparación con los resultados obtenidos por el receptor a través de la señal SIS de EGNOS se deduce lo siguiente:

- En términos de precisión, exactitud y fiabilidad, la calidad del posicionamiento y los niveles de protección conseguidos mediante el algoritmo de aumentación ejecutado por la aplicación *cloud* empleando los datos de EDAS fueron los mismos que los obtenidos por el receptor de usuario procesando la señal SIS. La Ilustración 38 muestra el error en el cálculo de la solución PVT obtenida, que es menor cuando se emplea EDAS. Para el cálculo de los niveles de protección PL, también se obtienen en ambos casos los mismos resultados.
- La disponibilidad de la solución basada en *cloud* mejora con respecto al acceso directo a través de la señal SIS convencional, pues supone una ventaja en los casos en los que no se dispone de una buena visibilidad o cobertura de los satélites que emiten la señal SIS. Además, el acceso a EDAS a través de la nube supone una mejora en la provisión de los datos, pues en el caso convencional el tiempo para obtener las correcciones a aplicar puede ser superior a 2 minutos en el peor de los casos.

- En cuanto al tiempo de respuesta del algoritmo ejecutado en la nube, la rapidez de la solución para atender las solicitudes de los usuarios o detectar degradación de las prestaciones es satisfactoria. Los parámetros que influyen en este tiempo son el tiempo de ejecución del algoritmo de aumentación en la nube, el retardo en la transmisión de los datos entre el dispositivo y la nube, debido a la latencia de la red de comunicación y la recuperación de los mensajes EDAS desde la base de datos remota del *cloud*. El objetivo en este caso, como se ha comentado, es obtener tiempos de respuesta inferiores a 1 s.

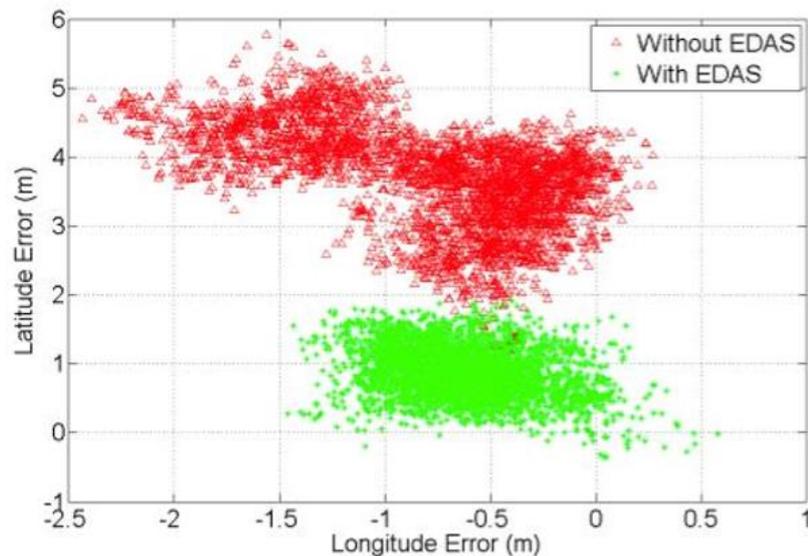


Ilustración 38. Posiciones estimadas con el método de los mínimos cuadrados mediante *cloud computing* [Ref.70]

En resumen, los resultados de estas pruebas demuestran que la solución basada en *cloud* representa una alternativa viable para proporcionar datos de aumentación, con rendimientos capaces de ofrecer soporte a aplicaciones en tiempo real.

Además, teniendo en consideración el potencial que ofrecerá el despliegue de las redes 5G y las prestaciones ampliamente mejoradas en términos de latencia y fiabilidad de los datos transmitidos puede resultar una opción prometedora para su explotación en un futuro próximo. Esto permitiría extender el uso de EGNOS con receptores GNSS de uso común evitando la necesidad de tener que invertir en un receptor compatible con EGNOS.

No obstante, es preciso llevar a cabo pruebas adicionales en entornos reales que confirmen la idoneidad de estas soluciones basadas en *cloud* a partir de datos EDAS.

En el ámbito concreto aeronáutico, además, se identifican algunos aspectos que es preciso resolver previamente a permitir su uso operacional:

- La declaración del servicio EDAS para su uso por parte de aplicaciones críticas de seguridad, SoL, ya que, en la actualidad, aunque ofrece buenas prestaciones, no está permitido su uso para estas aplicaciones. Esto supondría tener que realizar un programa de validación operacional del sistema para

demostrar y asegurar el cumplimiento de los requerimientos establecidos para su uso por la aviación civil. En Europa, esta validación debería coordinarse a través de Eurocontrol, EASA y otros organismos implicados en la seguridad de la aviación europea, siguiendo un proceso similar a la validación llevada a cabo para la declaración del servicio SoL de EGNOS.

- Definir el algoritmo para emplear los datos en la obtención de la posición mejorada de acuerdo con los estándares y requerimientos de la aviación civil, ya que en la actualidad no se ha concretado cómo debe recuperarse la información de aumentación a partir de un servicio como EDAS. Si se confirma que se satisfacen los requerimientos, someterlo a un proceso de certificación/aprobación para autorizar su uso en el ámbito aeronáutico.
- Establecer el marco regulatorio que garantice el uso de estos servicios con total garantía para la seguridad de las operaciones en los espacios aéreos en los que se permita su empleo.

5. Conclusiones

El incremento continuo en la evolución del tráfico aéreo en los últimos años plantea la necesidad de evolucionar la gestión del tránsito aéreo desde un modelo inflexible basado en costosas infraestructuras terrestres hacia sistemas avanzados basados en nuevas tecnologías.

En este escenario, los sistemas de aumentación basados en satélite (SBAS) como EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), ofrecen la función de aumentar los sistemas de navegación globales (GNSS), como el GPS estándar (SPS). Para ello, EGNOS emplea la señal civil C/A de GPS en la frecuencia L1 (1575,42 MHz) y proporciona correcciones e información de integridad para la mejora del servicio en la región europea. En un futuro, EGNOS evolucionará para disponer de capacidad multi constelación y multi frecuencia, con lo que podrá aumentar tanto la señal GPS como Galileo, en las frecuencias L1 y L5.

El servicio SoL (*Safety of Life*) de EGNOS, disponible de forma abierta y gratuita, está diseñado específicamente para aplicaciones de transporte críticas para la seguridad en diferentes ámbitos. En particular, el servicio cumple con los exigentes requisitos de los estándares y normas de la aviación, y da soporte a las diferentes fases de vuelo de una aeronave.

A lo largo del presente Trabajo Final de Máster se ha descrito extensamente los principios de funcionamiento del sistema, su arquitectura funcional y los diferentes niveles de servicio ofrecidos, así como su aplicación práctica, que era el primero de los objetivos a cubrir.

Para cumplir con el segundo objetivo, en particular, se ha abordado el caso de uso de EGNOS para las operaciones aeronáuticas, incidiendo en el empleo del sistema para la implantación de procedimientos de aproximación con guiado vertical (APV), y estudiando las prestaciones ofrecidas para este caso concreto. Sobre el estado de implantación, se concluye que en España se desarrolla a un ritmo inferior al de Europa, si bien hay un número considerable de aeropuertos en los que los planes de implantación se encuentran avanzados, en parte con el fin de dar cumplimiento a la normativa en materia de PBN (navegación basada en las prestaciones).

El concepto PBN define una serie de especificaciones de navegación entre las que se encuentra la RNP APCH, empleada para la fase de aproximación. De los mínimos de operación que define RNP APCH, son los LPV los que habilitan aproximaciones 3D basadas en EGNOS. El principal beneficio de la implantación de los procedimientos RNP APCH es la mejora en la seguridad, pues reducen significativamente el riesgo de eventos CFIT (*Controlled Flight into Terrain*) al proporcionar una aproximación estabilizada. Además, el guiado vertical mejora la conciencia situacional de los pilotos.

El proceso de implantación de los procedimientos de vuelo es largo y complejo, en el que intervienen diversas partes: operadores aéreos, el proveedor de servicios de navegación aérea (ANSP), la autoridad nacional de supervisión de la seguridad, entre otros.

La implantación de los procedimientos tiene repercusión económica a nivel ANSP/gestor aeroportuario y operador aéreo. A nivel ANSP/gestor aeroportuario, se debe realizar una inversión en el diseño de los procedimientos, la validación en vuelo y otros trabajos de publicación, realización de estudios de seguridad o formación del personal. No obstante, también se obtienen ventajas del empleo de los procedimientos basados en satélites sobre las radioayudas terrestres convencionales, en cuanto a ahorro en costes de renovación de equipamiento y de mantenimiento necesarios. Para los operadores aéreos, los costes dependerán del tipo de aeronave empleado e incluyen la adquisición e instalación de equipamiento, la certificación y la capacitación de la tripulación de vuelo.

Empleando la herramienta de soporte EBCAST que ofrece el proveedor del servicio EGNOS (ESSP) para realizar un análisis coste-beneficio de la implantación, se obtiene como resultado la viabilidad de la inversión en términos económicos. El análisis se basa en una metodología en la que se evalúan los beneficios de la implantación, cuantificando las mejoras operacionales relacionadas con evitar retrasos y desvíos que pueden producirse por una reducción de los mínimos de operación con este tipo de aproximaciones con guiado vertical. Adicionalmente, se consideran los costes asociados al diseño y al mantenimiento de la infraestructura terrestre existente, así como los planes de racionalización de estas. En los supuestos estudiados, se ha visto que la implantación es en general rentable, especialmente en escenarios en los que está prevista la retirada de alguna de las instalaciones terrestres que da soporte a aproximaciones de no precisión, situación hacia la que se tiende, dadas las disposiciones regulatorias en la materia.

Sin embargo, debe enfatizarse que la decisión final sobre la implantación de los procedimientos no debe basarse solo en consideraciones económicas y ganancias anticipadas. Es fundamental considerar factores como el aumento del nivel de seguridad, la mejora en la accesibilidad y sostenibilidad, y los beneficios operativos.

Por último, para conseguir el tercer objetivo, consistente en estudiar la viabilidad del uso de EGNOS en el *cloud*, se ha hecho un análisis de la tendencia en el desarrollo de los receptores GNSS y su compatibilidad con EGNOS, en donde la línea de evolución pasa por un modelo de receptor basado en software y continúa hacia un modelo de receptor basado en *cloud*.

Las características del *cloud computing* ofrecen altos niveles de fiabilidad, flexibilidad y escalabilidad, a la vez que permiten reducir costes en cuanto a tiempo y esfuerzo de desarrollo y gestión. El procesamiento se realiza directamente en la red, de forma que se reduce o elimina el procesado realizado en los dispositivos/receptores de los usuarios.

La integración de la información del servicio EDAS (EGNOS Data Access Service) con tecnologías como la computación en la nube, ofrece nuevas oportunidades para obtener prestaciones mejoradas en los receptores GNSS de uso común, empleando redes móviles Wifi/3G/4G/5G.

En los casos que implementan esta arquitectura basada en cloud el receptor enviaría la señal GNSS digitalizada a la nube, donde se procesaría y calcularía la solución de navegación a partir de datos de EDAS a través del propio *cloud*, devolviendo al usuario la posición corregida.

El despliegue futuro de las redes 5G darán respuesta al incremento en los requisitos del tráfico datos ante la necesidad creciente de servicios, lo que abre nuevas oportunidades y modelos de negocio. La provisión de estos servicios continúa siendo un reto para la industria de telecomunicaciones, si bien características asociadas a la 5G, como la alta fiabilidad y la baja latencia (URLLC), permitirán beneficios en términos de seguridad y mejora en la precisión de la localización.

En términos generales, la planificación establecida al comienzo del Trabajo ha resultado de gran ayuda para acotar temporalmente los hitos y tareas a realizar y ha permitido alcanzar satisfactoriamente los objetivos planteados inicialmente y que se han comentado anteriormente. Señalar, que la declaración del estado de alarma en España por la crisis sanitaria provocada por el coronavirus, contexto bajo el que se ha desarrollado este Trabajo Final de Máster ha supuesto una dificultad añadida imprevista al realizar la planificación inicial y ha introducido un factor de incertidumbre en las previsiones futuras, tanto de crecimiento y desarrollo del sector aéreo como de los actuales planes de implantación de los procedimientos basados en EGNOS.

Finalmente, el estudio ha permitido profundizar en aspectos técnicos y operacionales de un sistema que ofrece en la actualidad un gran potencial y que se encuentra en continua evolución con multitud de aplicaciones y desarrollo de nuevos servicios que ampliarán sus horizontes en un futuro.

6. Glosario

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i>
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AIS	Servicio de Información Aeronáutica
ANSP	Proveedor de Servicios de Navegación Aérea
AOPA	Asociación de Pilotos y Propietarios de Aeronaves
APV	<i>Approach with Vertical guidance</i> (aproximación con guiado vertical)
ATC	Control de Tráfico Aéreo
ATM	Gestión del Tránsito Aéreo
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CANSO	Organización de los Servicios de Navegación Aérea Civil
CAPEX	Costes de instalación
CFIT	<i>Controlled Flight into Terrain</i> (colisiones contra el terreno en vuelo controlado)
CNS	Comunicación, Navegación y Vigilancia
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CPF	<i>Central Processing Facility</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
DDC	<i>Delays, Diversions, Cancellations</i>
DGNSS	Correcciones diferenciales GNSS
DH	<i>Decision Height</i>
DME	<i>Distance measuring equipment</i>
EASA	Agencia Europea de Seguridad Aérea
EBAA	Asociación Europea de Aviación de Negocios
ECAC	Conferencia Europea de Aviación Civil
ECS	Sistemas <i>Edge computing</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay System</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
ENT	<i>EGNOS Network Time</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ERAA	Asociación de Compañías de la Regiones Europeas
ESP	Proveedor de servicios EGNOS
ESSP	<i>European Satellite Services Provider</i>
ETRF	<i>EGNOS Terrestrial Reference Frame</i>

EWA EGNOS Working Agreement

EWAN EGNOS Wide Area Network

FAS DB Final Approach Segment Data Block

FIR Flight Information Region

FMS Flight Management System

GBAS Ground Based Augmentation System

GIC Ground Integrity Channel

GIVD Grid Ionospheric Vertical Delay

GIVE Grid Ionospheric Vertical Error

GNSS Global Navigation Satellite System

GSA Agencia europea GNSS

HAL Límite de Alerta Vertical

HARQ Hybrid Automatic Repeat Request

HIT Handover Interruption Time

HOF Handover Failure

HPE Error de posición horizontal

HPL Nivel de protección horizontal

HTTP REST Representational state transfer

IaaS Infraestructura como Servicio

IATA Asociación Internacional para el Transporte Aéreo

IFP Procedimientos de vuelo por instrumentos

IGP Ionospheric Grid Points

ILS Instrument Landing System

IoT Internet of Things

ITU International Telecommunication Union

IODP Issue of Data PRN Mask

IPP Ionospheric Pierce Point

LBAS Servicios basados en localización

LNAV Lateral Navigation

LNAV/VNAV Lateral Navigation/Vertical Navigation

LP Localiser Performance

LPV Localiser Performance with Vertical guidance

LTE Long-Term Evolution

MCC Mission Control Centres

MOPS Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment

MC/MF Multi-Constelación Multi-Frecuencia

mMTC Massive Machine Type Communication

MT *Message Type*

NaaS *Navegación como Servicio*

NDB *Non-directional Beacon*

NFV *Network Function Virtualisation*

NLES *Navigation Land Earth Stations*

NPA *Non-Precision Approach*

NR *New Radio*

NSA *Non-Standalone*

NSE *Error del Sistema de Navegación*

Ntrip *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*

OACI *Organización Internacional de Aviación Civil*

OCA/H *Altitud/altura de franqueamiento de obstáculos*

OPEX *Costes de operación*

PA *Precision Approach*

PaaS *Plataforma como Servicio*

PBN *Navegación basada en Prestaciones*

PRN *Pseudo-random noise*

PVT *Position, Velocity and Time, Solución de navegación*

RAN *Radio Access Network*

RF *Radiofrecuencia*

RIMS *Ranging Integrity Monitoring Stations*

RNAV *Navegación de área*

RNP *Prestación de navegación requerida*

RNP APCH *Aproximación RNP*

RTCA *Radio Technical Commission for Aeronautics*

RTCM *Radio Technical Commission for Maritime*

RTK *Real-Time Kinematic*

SA *Standalone*

SaaS *Software como Servicio*

SARPS *Standards and Recommended Practices*

SBAS *Satellite Based Augmentation System*

SDN *Software Defined Networking*

SDR *Software defined Radio*

SES *Single European Sky*

SFD *Satellite Failure Detection*

SISNet *Signal in Space over the Internet*

SoL *Safety of Life*

SIS *Signal in Space*
TTA *Time To Alert*
TTI *Transmission Time Interval*
UDRE *User Differential Range Error*
UERE *User Equivalent Range Error*
UIRE *User Ionospheric Range Error*
URA *User Range Accuracy*
URLLC *Ultra-reliable low latency communication*
UTC *Universal Time Coordinated*
VAL *Límite de Alerta Vertical*
VOR *Very High Frequency (VHF) Omni-Directional Range*
VPE *Error de posición vertical*
VPL *Nivel de protección vertical*
WAD *Wide Area Differential corrections*

7. Bibliografía

- [Ref.1] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map
- [Ref.2] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/ebcast-tool
- [Ref.3] A. Favenza, M. Pasin, G. Marucco, F. Scullino, "Challenges and opportunities of EGNOS/EDAS augmentation and integrity computation in the cloud", Proc. ION GNSS+, pp. 1-10, Sept. 2004
- [Ref.4] <https://www.gsa.europa.eu/egnos/edas>
- [Ref.5] D. Soldani, Y. J. Guo, B. Barani, P. Mogensen, I. Chih-Lin, S. K. Das, "5G for ultra-reliable low-latency communications", IEEE Network, Guest Editorial, March/April, pp. 6-7, 2018
- [Ref.6] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Safety_of_Life_Service
- [Ref.7] EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document Issue 3.3, 26/03/2019
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf
- [Ref.8] <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/>
- [Ref.9] OACI SARPS (Standards and Recommended Practices) Anexo 10 Telecomunicaciones Aeronáuticas, Volumen I Radioayudas para la navegación, 7ª Edición Julio 2018
- [Ref.10] RTCA Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment DO-229D, December 2006
- [Ref.11] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf
- [Ref.12] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_EGNOS_SBAS_Message_Format_Explained
- [Ref.13] Jean-Marc Piéplu, GSA. EGNOS Programme Update, EGNOS Workshop-Rome, 24-25 Sept. 2019
- [Ref.14] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals
- [Ref.15] Brocard, D., T. Maier, and C. Busquet. "EGNOS Ranging and Integrity Monitoring Stations (RIMS)." GNSS 2000 Conference, Edinburgh, Scotland, UK. 2000.
- [Ref.16] Ventura-Traveset, J., P. Michel, and L. Gauthier. "Architecture, mission and signal processing aspects of the EGNOS System: the first European implementation of GNSS", 7th International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications, Sesimbra (Portugal). 2001
- [Ref.17] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Ground_Segment
- [Ref.18] THE EGNOS SYSTEM ARCHITECTURE EXPLAINED; Didier Flament, Jean Poumailloux, Jean-Louis Damidaux, Stéphane Lannelongue Alcatel Alenia Space, France ; Javier Ventura-Traveset, P. Michel and C. Montefusco ; European Space Agency, EGNOS Project Office, Mayo 2011
- [Ref.19] The EGNOS Signal Explained, EGNOS Fact Sheet, ESA
- [Ref.20] User Guide for EGNOS application developers, Ed. 2.0, 15/12/2011, ISBN 978-92-79-20335-0, ESA.
- [Ref.21] Biswas, Sanat. Computationally Efficient Non-Linear Kalman Filters for On-board Space Vehicle Navigation, 2017

- [Ref.22] EGNOS SoL Service Roadmap, April 2020, versión 4.3
- [Ref.23] <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/beyond-cat-i-egnos-evolution-aviation-safety>
- [Ref.24] Doc. 9613 OACI Manual de navegación basada en la performance (PBN), 4ª Edición 2013
- [Ref.25] AIP-España (Publicación de Información Aeronáutica), <https://ais.enaire.es/aip/>
- [Ref.26] Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation, September 2015
- [Ref.27] EUR RNP APCH Guidance Material (EUR Doc 025)
- [Ref.28] <https://www.osmaviationacademy.com/blog/what-is-an-instrument-approach-procedure>
- [Ref.29] Reglamento de Ejecución (UE) 2018/1048 de la Comisión, por el que se establecen los requisitos de utilización del espacio aéreo y los procedimientos operativos en relación con la navegación basada en la performance, <https://www.boe.es/doue/2018/189/L00003-00008.pdf>
- [Ref.30] Reglamento (UE) 2018/1139 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por que se crea una Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1139&from=EN>
- [Ref.31] <https://www.eurocontrol.int/product/required-navigation-performance-approach>
- [Ref.32] https://ext.eurocontrol.int/airport_map_tool
- [Ref.33] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, <https://www.mitma.gob.es/aviacion-civil/estrategia-de-navegacion-aerea/politica-y-marco-estrategico-pbn>
- [Ref.34] Doc. 8168 OACI Procedimientos para los servicios de navegación aérea, Operación de aeronaves, Volumen II Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos, 6ª Edición, 2014.
- [Ref.35] Doc. 9906 OACI Manual de garantía de calidad para el diseño de procedimientos de vuelo, Volumen II Capacitación de diseñadores de procedimientos de vuelo, 1ª Edición, 2009
- [Ref.36] OACI SARPS (Standards and Recommended Practices) Anexo 14 Aeródromos, Volumen I Diseño y operaciones de aeródromos, 7ª Edición, Julio 2016
- [Ref.37] EBCAST User Manual Ref: ESSP-MEMO-15475, 14.09.2015
- [Ref.38] Simple Business Case methodology for LPVs in Aviation (EBCAST tool) - ESSP-MEMO13973, version 02-00, 20.11.2019
- [Ref.39] Business case for LPV implementation at Habib Bourguiba International Airport, MEDUSA project, 23/09/2013
- [Ref.40] European Aviation in 2040, Challenges of Growth, Annex 1, Flight Forecast to 2040, September 2018
- [Ref.41] <http://www.aena.es/csee/Satellite?pagename=Estadisticas/Home>
- [Ref.42] Reglamento de Ejecución (UE) 716/2014 de la Comisión, relativo al establecimiento del proyecto piloto común destinado a respaldar la ejecución del Plan Maestro de Gestión del Tránsito Aéreo europeo, <https://www.boe.es/doue/2014/190/L00019-00044.pdf>
- [Ref.43] Reglamento (UE) 2016/539 de la Comisión, por el que se modifica el Reglamento (UE) nº 1178/2011 en lo que respecta a la formación, las pruebas y las verificaciones periódicas de los pilotos para la navegación basada en la performance, https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4496916/reglamento_ue_2016_539_de_la_comision_de_6_de_abril_de_2016.pdf

- [Ref.44] Reglamento (UE) de la Comisión, que modifica el Reglamento (UE) nº 965/2012 en lo que se refiere a la aprobación operacional de la navegación basada en la performance, la certificación y la supervisión de los proveedores de servicios de datos y las operaciones en el mar de helicópteros y que corrige dicho Reglamento <https://boe.es/doue/2016/198/L00013-00037.pdf>
- [Ref.45] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Receivers
- [Ref.46] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/System_Design_Details
- [Ref.47] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Generic_Receiver_Description
- [Ref.48] GNSS User Technology Report Issue 1, GSA, 2016
- [Ref.49] GNSS User Technology Report Issue 2, GSA, 2018
- [Ref.50] https://en.wikipedia.org/wiki/GNSS_software-defined_receiver
- [Ref.51] EGNOS Data Access Service (EDAS), Service Definition Document, revision 2.2, 03/06/2019
- [Ref.52] EDAS Client SW User Manual, ESSP-PRC-6977, Edición 03-02, 18/11/2016
- [Ref.53] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/documents/field_gc_document_type/yearly-report-82
- [Ref.54] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/documents/field_gc_document_type/monthly-performance-report-84
- [Ref.55] SISNet User Interface Document, versión 3.1, 15/05/2006
- [Ref.56] EDAS SISNeT Service User Information Package, version 1.4, 07/02/2019
- [Ref.57] EDAS Ntrip Service User Information Package, version 2.4, 18/07/2018
- [Ref.58] Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) Version 1.0
- [Ref.59] Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) Version 2.0
- [Ref.60] Plan Nacional 5G 2018-2020, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital
- [Ref.61] <https://www.everythingrf.com/community/what-is-urlc>
- [Ref.62] Murtaza Ahmed, Heejung Yu, Jingon Joung, 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices, Electronics, MDPI, Published 2/09/2019
- [Ref.63] 3GPP TR 38.913 V14.3.0, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 14)," June 2017
- [Ref.64] Guillermo Pocovi, Hamidreza Shariatmadari, Gilberto Berardinelli, Klaus Pedersen, Jens Steiner, Zexian Li, Achiveieng Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Challenges and Envisioned Systems Enhancements, 5G for URLLC, IEEE Network, March/April 2018
- [Ref.65] Victor Huertas García, Rafael Gallego Terris, Modulo 2: NGN y el camino hacia la 5G, UOC, 01/09/2018
- [Ref.66] Victor Huertas García, Modulo 4: La virtualización de las redes, UOC, 01/09/2018
- [Ref.67] Hu, Y.L.; Schmeink, A. Delay-Constrained Communication in Edge Computing Networks. In Proceedings of the 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Kalamata, Greece, 25–28 June 2018
- [Ref.68] Duan, Y.F.; She, C.Y.; Zhao, G.D.; Quek, T.Q.S. Delay Analysis and Computing Offloading of URLLC in Mobile Edge Computing Systems. In Proceedings of the 2018 10th

International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP),
Hangzhou, China, 18–20 October 2018

[Ref.69] Helena Rifa, Rafael Gallego, Victor Huertas, Modulo 1 RNGN, Contexto actual y
evolución hacia las redes de nueva generación, 01/09/2018

[Ref.70] A. Favenza, C. Rossi, M. Pasin, F. Dominici, “A cloud-based approach to GNSS
augmentation for navigation services”, 7th International Conference on Utility and Cloud
Computing IEEE/ACM 2014

[Ref.71] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/gps_egnos

8. Anexos

Anexo A Errores de posición horizontal y vertical (HPE/VPE)

Anexo B Prestaciones del sistema EGNOS para aproximaciones con guiado vertical

Anexo C Datos de entrada y resultados obtenidos con EBCAST Tool

Anexo D Prestaciones del servicio EDAS

Anexo A. Errores de posición horizontal y vertical (HPE/VPE)

Se incluyen a continuación a modo de ejemplo diferentes valores del error de posición horizontal y vertical obtenidos con EGNOS y con GPS para diferentes RIMS con datos que ofrece el proveedor de servicio EGNOS (ESSP) para fecha 31 de marzo de 2020 [Ref.71].

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Santiago de Compostela y el satélite GEO PRN123:

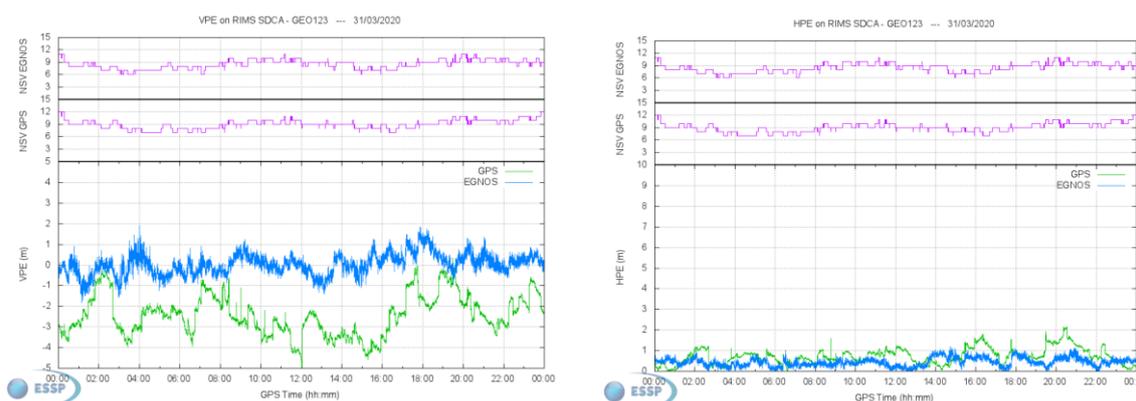


Ilustración 39. Valores de VPE y HPE para la RIMS SDCA y GEO123 para el 31/03/2020

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Santiago de Compostela y el satélite GEO PRN136:

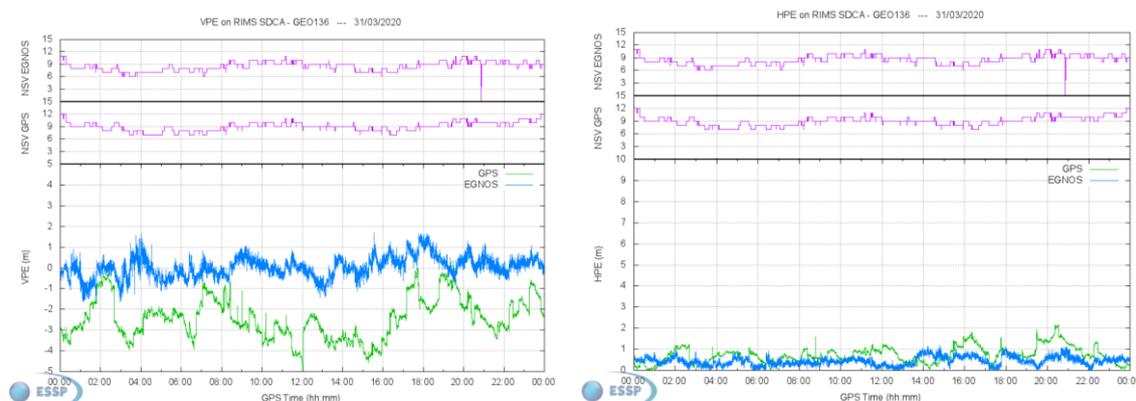


Ilustración 40. Valores de VPE y HPE para la RIMS SDCA y GEO136 para el 31/03/2020

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Palma de Mallorca y el satélite GEO PRN123:

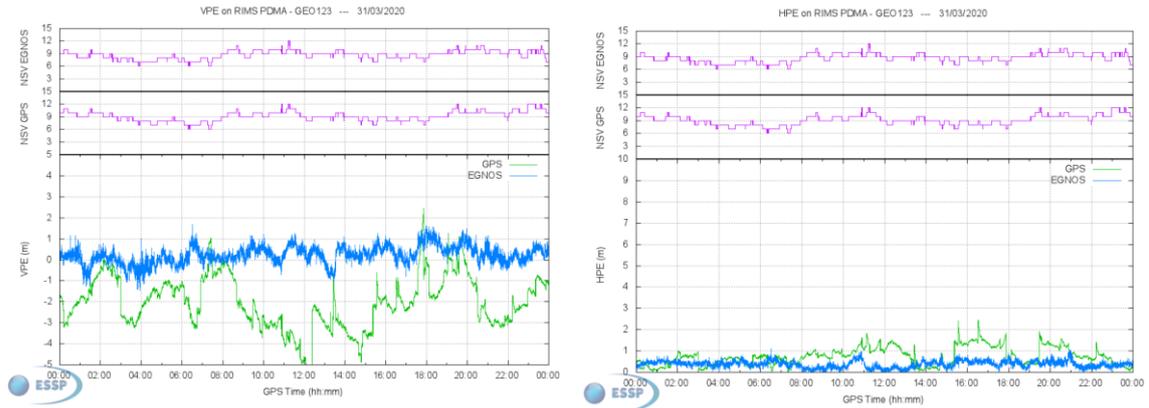


Ilustración 41. Valores de VPE y HPE para la RIMS PDMA y GEO123 para el 31/03/2020

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Palma de Mallorca y el satélite GEO PRN136:

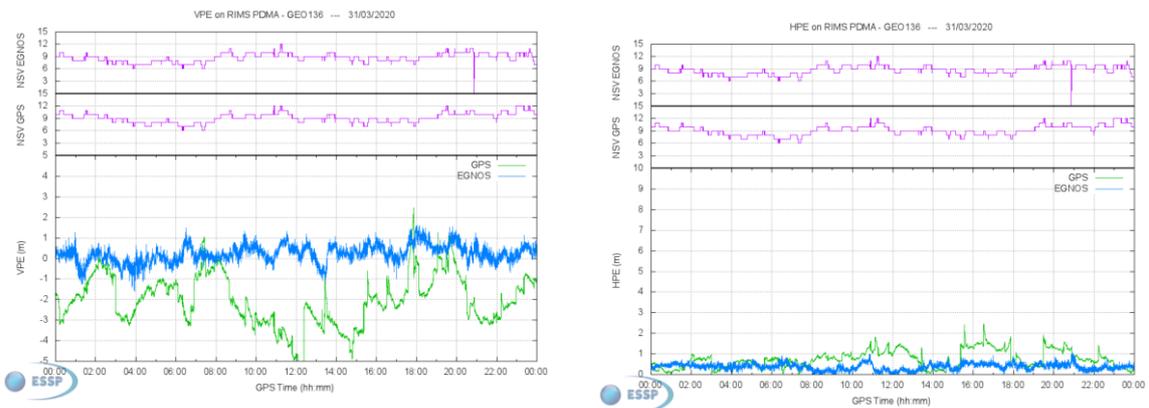


Ilustración 42. Valores de VPE y HPE para la RIMS PDMA y GEO136 para el 31/03/2020

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Málaga y el satélite GEO PRN123:

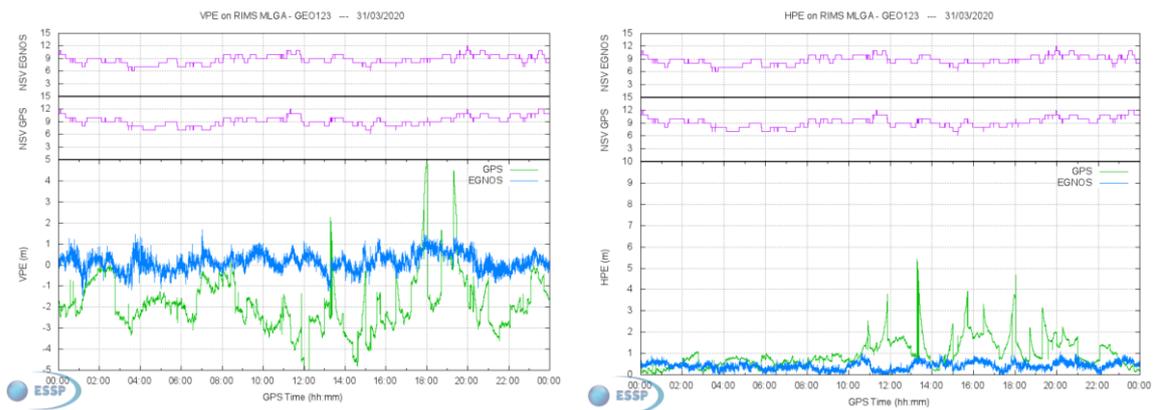


Ilustración 43. Valores de VPE y HPE para la RIMS MLGA y GEO123 para el 31/03/2020

Valores de VPE y HPE obtenidos con la RIMS de Málaga y el satélite GEO PRN136:

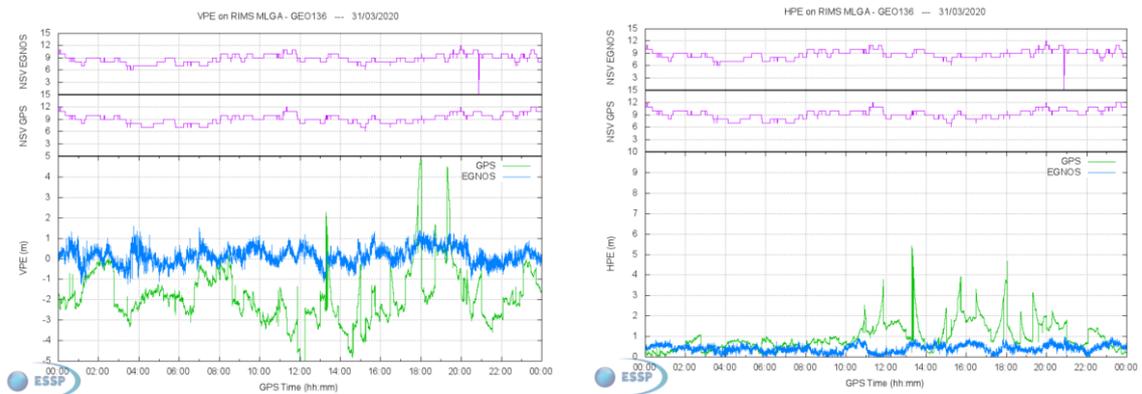


Ilustración 44. Valores de VPE y HPE para la RIMS MLGA y GEO136 para el 31/03/2020

Anexo B. Prestaciones del sistema EGNOS para aproximaciones con guiado vertical

Se incluyen a continuación las prestaciones ofrecidas por el sistema EGNOS en el caso de las aproximaciones con guiado vertical, según los datos disponibles para el primer trimestre de 2020.

Disponibilidad APV-I [Ref.54]:

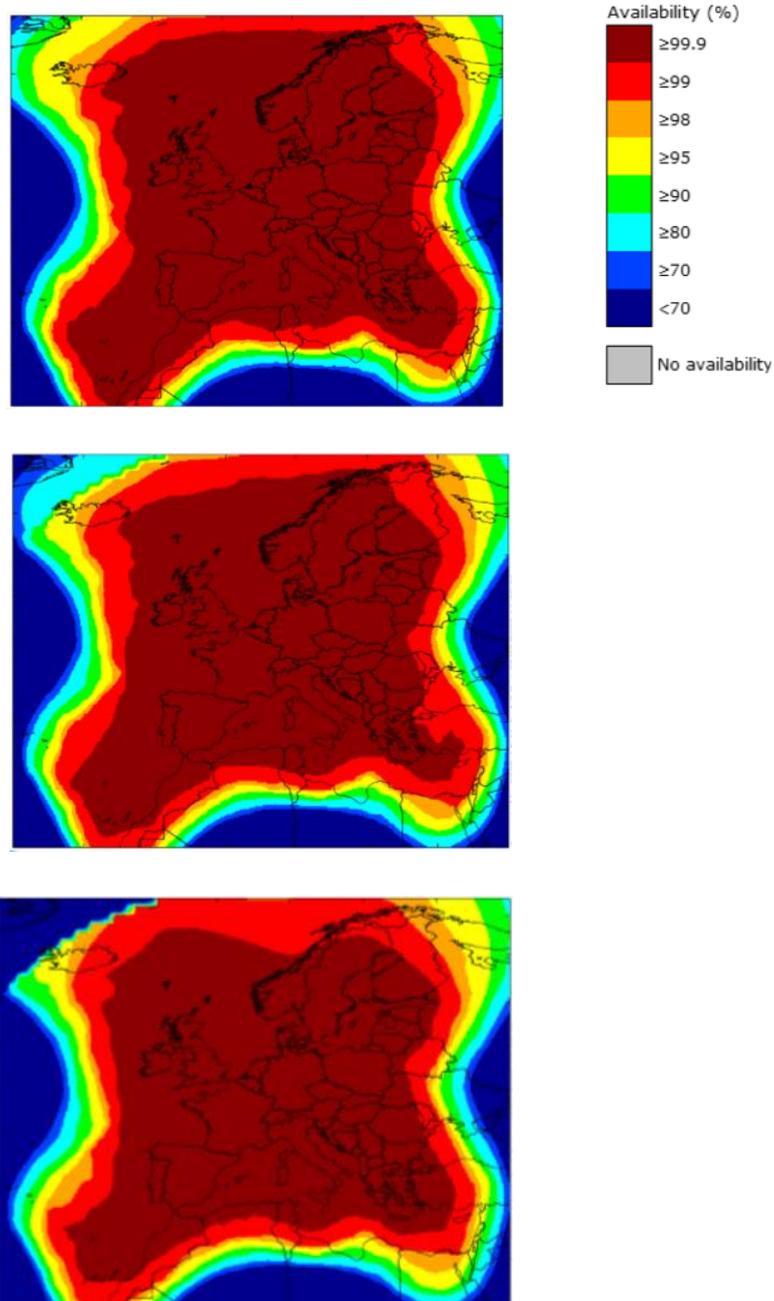


Ilustración 45. Valores de disponibilidad APV-I para el primer trimestre de 2020

Disponibilidad LPV-200 [Ref.54]:

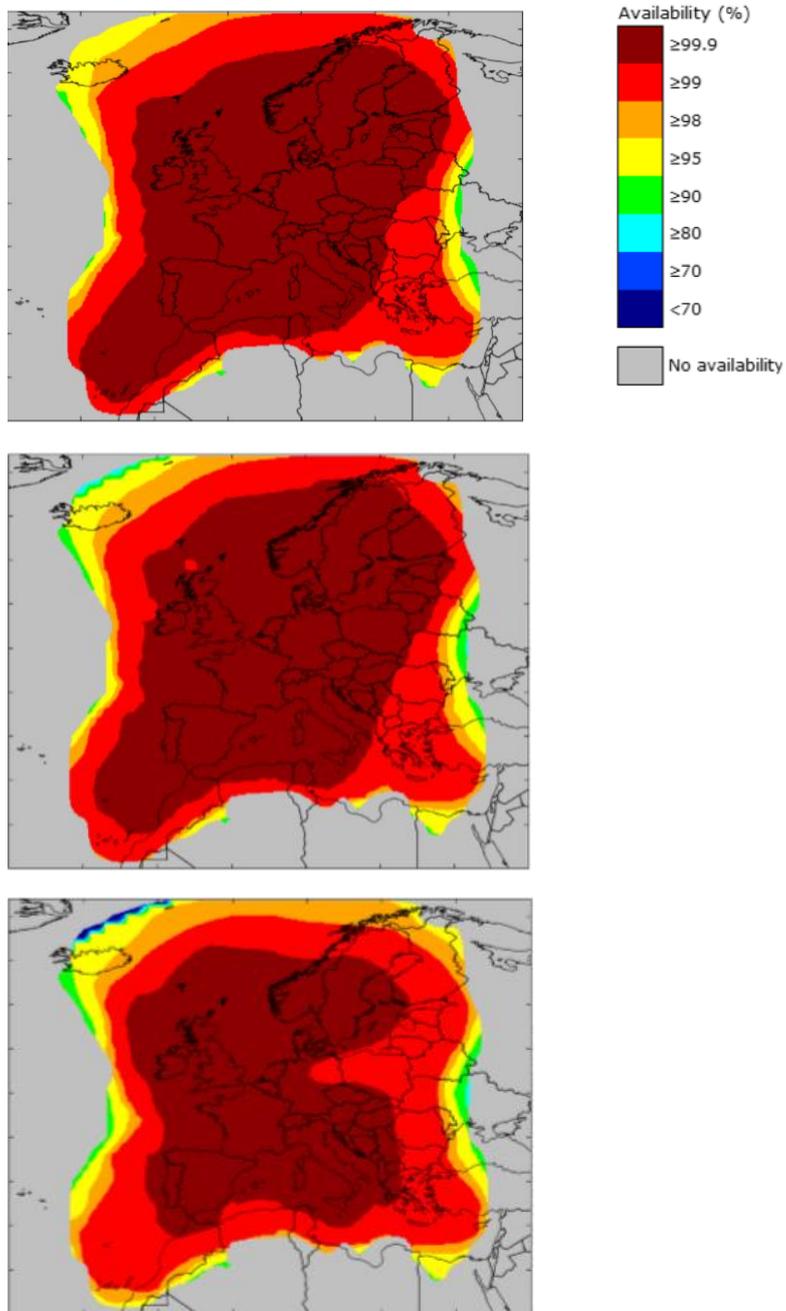


Ilustración 46. Valores de disponibilidad LPV-200 para el primer trimestre de 2020

Continuidad APV-I [Ref.54]:

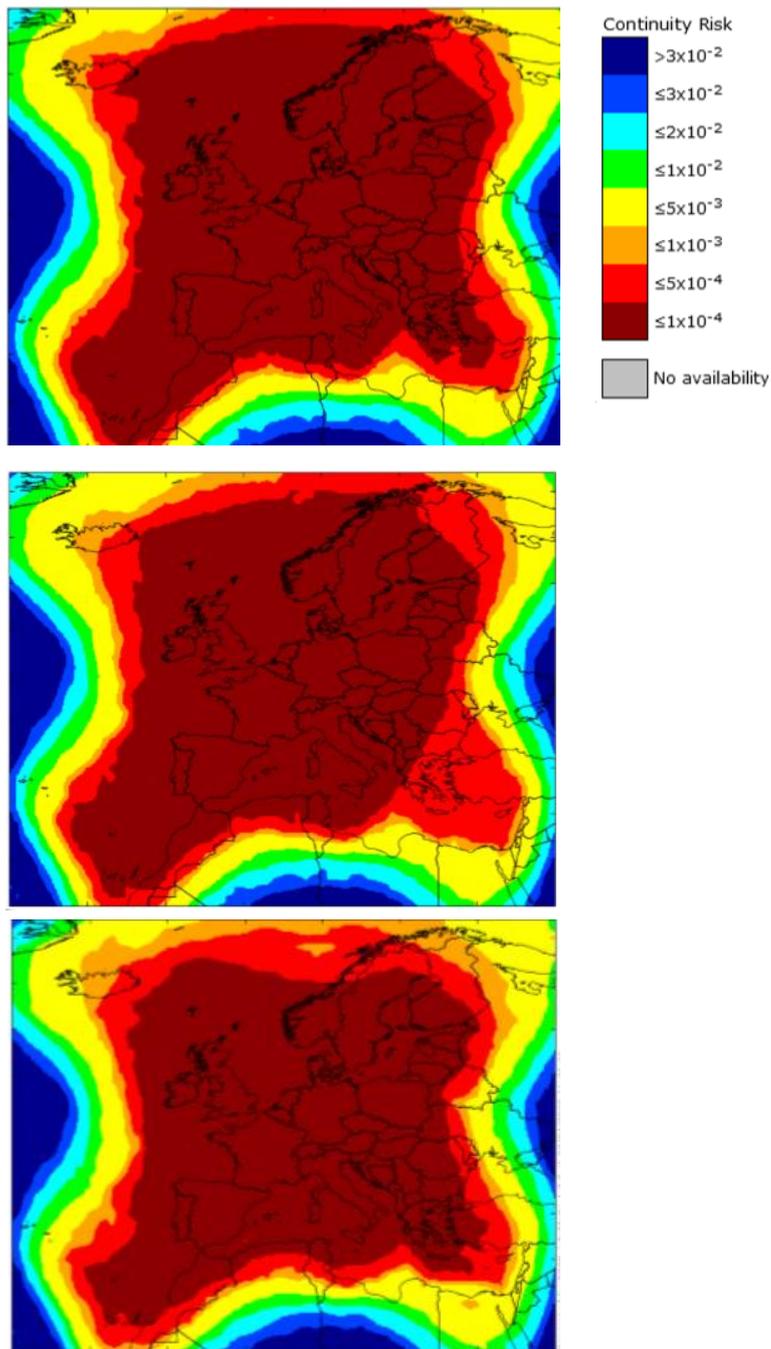


Ilustración 47. Valores de continuidad APV-I para el primer trimestre de 2020

Continuidad LPV-200 [Ref.54]:

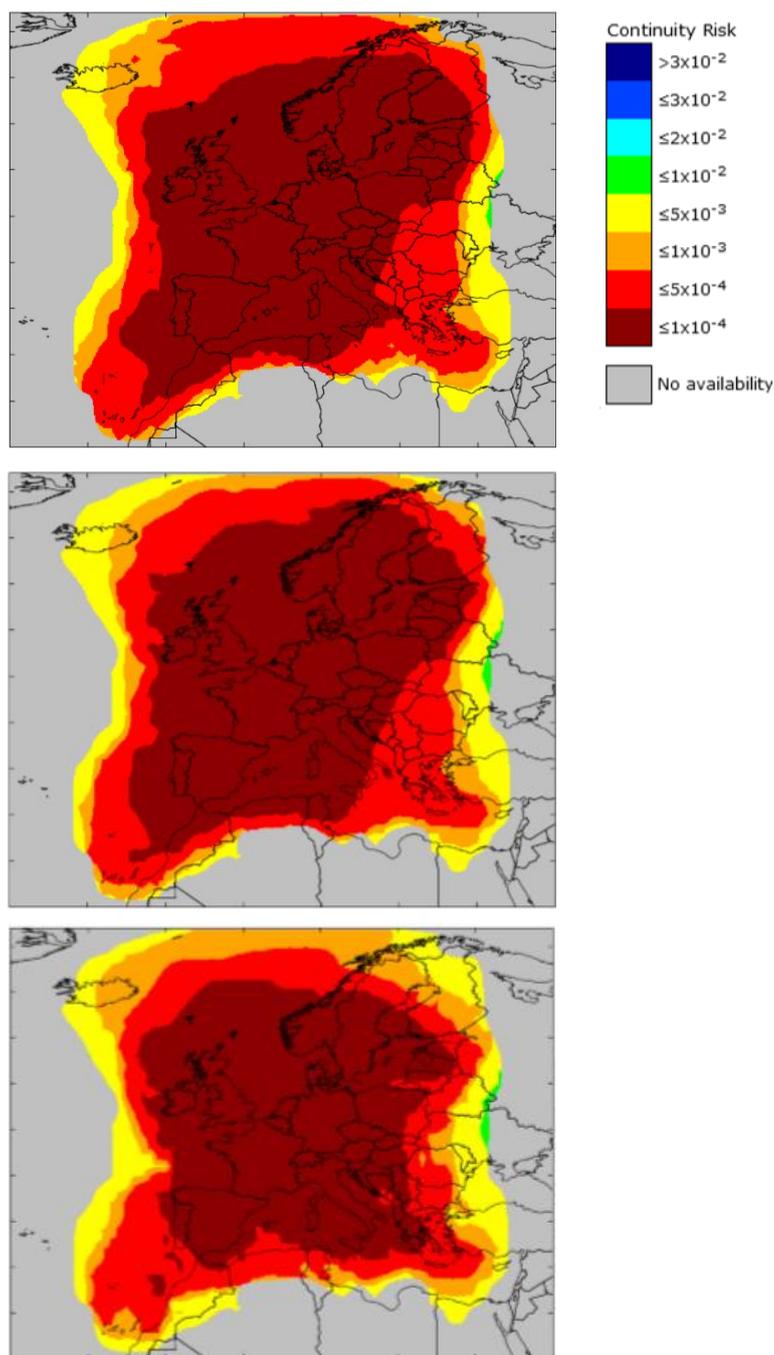


Ilustración 48. Valores de continuidad LPV-200 para el primer trimestre de 2020

En el caso de los aeropuertos españoles que emplean el sistema EGNOS para procedimientos de tipo APV-I, las prestaciones fueron de un 100% de disponibilidad y sin riesgo de continuidad ni indisponibilidad del servicio en el mes de enero. En el mes de febrero se registraron 19 caídas del servicio, una disponibilidad del 99,98% y 2.99E-05 de riesgo de continuidad en el caso de Lanzarote, y en Vigo 1 fuera de servicio, con un 99,99% de disponibilidad y 5.99E-05 de riesgo de continuidad. En marzo se produjeron 62 caídas del servicio, un 99,97% de disponibilidad y 7.96E-05 de riesgo de continuidad en Lanzarote.

Anexo C. Datos de entrada y resultados obtenidos con EBCAST Tool

Escenario 1:

EBCAST TOOL Airport

[Exit to main menu](#)

Airports business case (1/5)

Airport characteristics

Average percentage of DDC occurrences (%)	<input type="text" value="0.59"/> <small>1</small>
Average percentage of DDC potentially avoidable thanks to EGNOS (%)	<input type="text" value="48.50"/> <small>1</small>
Number of runway ends in the airport	<input type="text" value="1"/>

Period

Period of analysis (from now on years)	<input type="text" value="10"/> <small>1</small>
--	---

Traffic and equipage forecast

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Traffic forecast, movements (baseline) <small>1</small>	<input type="text" value="6000"/>	<input type="text" value="6300"/>	<input type="text" value="6600"/>	<input type="text" value="6900"/>	<input type="text" value="7200"/>	<input type="text" value="7500"/>	<input type="text" value="7800"/>
Traffic proportion RW end #1 (%) <small>1</small>	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="40"/>				
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #1 (%) <small>1</small>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
% of equipped fleet, forecast (baseline) <small>1</small>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5.75"/>	<input type="text" value="6.61"/>	<input type="text" value="9.92"/>	<input type="text" value="21.82"/>	<input type="text" value="48.01"/>	<input type="text" value="60.01"/>

Airports business case (2/5)

Investment configuration

Runway end #1

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2020 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Airports business case (3/5)

Savings model configuration

Ground-side revenue per movement (€)	712 
--------------------------------------	---

Navaid data: CAPEX

DME (k€)	225
ILS (k€)	650
ILS/DME (k€)	876
NDB (k€)	85
VOR (k€)	677
VOR/DME (k€)	900

Navaid data: OPEX

DME (k€)	11.3
ILS (k€)	32.5
ILS/DME (k€)	43.8
NDB (k€)	5
VOR (k€)	33.9
VOR/DME (k€)	45.1

Lifetime

Lifetime (years)	15
------------------	----

Airports business case (4/5)

Savings model configuration

Decommissioning plans

Number of nav aids	1 ▼
Nav aid #1 type	NDB ▼
- when? (year)	2022

Airports business case (5/5)

Other economic parameters

Discount rate (without inflation) (%)	4
---------------------------------------	---

Airports business case (Results)

Savings of disruption costs (constant euro)

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
RW end #1. Avoided disruptions	0.3	0.4	0.5	0.8	1.8	4.1	5.4	6.4	7.0	7.6	8.2	8.6	9.0	9.3	9.7
RW end #1. Savings due to avoided DDC	244 €	295 €	356 €	558 €	1280 €	2934 €	3815 €	4555 €	4960 €	5394 €	5860 €	6116 €	6375 €	6641 €	6910 €

Benefits due to EGNOS-enabled network accessibility (constant euro):

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
RW end #1. Delta movs, EGNOS alone	0.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
RW end #1. Benefits, network accessibility	0 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €	897 €

Savings due to nav aids phase-out (constant euro):

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Nav aid #1	0 €	0 €	85000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €

BC Results					
Year	Investments	Periodic cost	Savings	Net savings	Accrued
2020	30000 €	- €	244 €	-29756 €	-29756 €
2021	- €	- €	1192 €	1192 €	-28563 €
2022	- €	- €	86253 €	86253 €	57689 €
2023	- €	- €	6455 €	6455 €	64144 €
2024	- €	- €	7177 €	7177 €	71322 €
2025	- €	1000 €	8832 €	7832 €	79153 €
2026	- €	- €	9712 €	9712 €	88865 €
2027	- €	- €	10453 €	10453 €	99318 €
2028	- €	- €	10857 €	10857 €	110175 €
2029	- €	- €	11291 €	11291 €	121466 €
NPV		97050.06 €			
Breakeven at		2.33 years			
IRR		81 %			

Escenario 2a:

EBCAST TOOL Airport

[Exit to main menu](#)

Airports business case (1/5)

Airport characteristics

Average percentage of DDC occurrences (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="0.59"/> <div style="font-size: 8px; color: #1a2b4a; margin-top: 2px;"> 1 </div>
Average percentage of DDC potentially avoidable thanks to EGNOS (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="48.50"/> <div style="font-size: 8px; color: #1a2b4a; margin-top: 2px;"> 1 </div>
Number of runway ends in the airport	<input style="width: 100%;" type="text" value="2"/>

Period

Period of analysis (from now on years)	<input style="width: 100%;" type="text" value="10"/> <div style="font-size: 8px; color: #1a2b4a; margin-top: 2px;"> 1 </div>
--	--

Traffic and equipage forecast

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Traffic forecast, movements (baseline)	<input style="width: 100%;" type="text" value="35000"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="36750"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="38500"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="40250"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="42000"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="43750"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="45500"/>
Traffic proportion RW end #1 (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="40"/>						
Traffic proportion RW end #2 (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="60"/>						
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #1 (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0.05"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #2 (%)	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0.05"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>
% of equipped fleet, forecast (baseline)	<input style="width: 100%;" type="text" value="5"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="5.75"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="6.61"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="9.92"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="21.82"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="48.01"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="60.01"/>

Airports business case (2/5)

Investment configuration

Runway end #1

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2022 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Runway end #2

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2022 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Airports business case (3/5)

Savings model configuration

Ground-side revenue per movement (€)	<input type="text" value="712"/>
--------------------------------------	----------------------------------

Navaid data: CAPEX

DME (k€)	<input type="text" value="225"/>
ILS (k€)	<input type="text" value="650"/>
ILS/DME (k€)	<input type="text" value="876"/>
NDB (k€)	<input type="text" value="85"/>
VOR (k€)	<input type="text" value="677"/>
VOR/DME (k€)	<input type="text" value="900"/>

Navaid data: OPEX

DME (k€)	<input type="text" value="11.3"/>
ILS (k€)	<input type="text" value="32.5"/>
ILS/DME (k€)	<input type="text" value="43.8"/>
NDB (k€)	<input type="text" value="5"/>
VOR (k€)	<input type="text" value="33.9"/>
VOR/DME (k€)	<input type="text" value="45.1"/>

Lifetime

Lifetime (years)	<input type="text" value="15"/>
------------------	---------------------------------

Airports business case (4/5)

Savings model configuration

Decommissioning plans

Number of nav aids	<input type="text" value="2"/>
Navaid #1 type	<input type="text" value="NDB"/>
- when? (year)	<input type="text" value="2023"/>
Navaid #2 type	<input type="text" value="VOR"/>
- when? (year)	<input type="text" value="2025"/>

Airports business case (5/5)

Other economic parameters

Discount rate (without inflation) (%)	<input type="text" value="4"/>
---------------------------------------	--------------------------------

Airports business case (Results)

Savings of disruption costs (constant euro)															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
RW end #1. Avoided disruptions	0.3	0.4	2.9	4.6	10.5	24.0	31.3	37.3	40.6	44.2	48.0	50.1	52.2	54	
RW end #1. Savings due to avoided DDC	244 €	295 €	2074 €	3254 €	7469 €	17118 €	22252 €	26573 €	28935 €	31466 €	34181 €	35674 €	37190 €	38 €	
RW end #2. Avoided disruptions	0.0	0.0	4.4	6.9	15.7	36.1	46.9	56.0	61.0	66.3	72.0	75.2	78.3	81	
RW end #2. Savings due to avoided DDC	- €	- €	3111 €	4881 €	11203 €	25676 €	33378 €	39860 €	43403 €	47199 €	51272 €	53511 €	55785 €	58 €	

Benefits due to EGNOS-enabled network accessibility (constant euro):															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
RW end #1. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
RW end #1. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €
RW end #2. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
RW end #2. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €

Savings due to navaid phase-out (constant euro):															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Navaid #1	0 €	0 €	0 €	85000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €
Navaid #2	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	677000 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €

BC Results					
Year	Investments	Periodic cost	Savings	Net savings	Accrued
2020	- €	- €	- €	- €	0 €
2021	- €	- €	- €	- €	0 €
2022	60000 €	- €	5185 €	-54815 €	-54815 €
2023	- €	- €	107464 €	107464 €	52649 €
2024	- €	- €	38000 €	38000 €	90649 €
2025	- €	- €	739123 €	739123 €	829772 €
2026	- €	- €	108859 €	108859 €	938631 €
2027	- €	2000 €	119663 €	117663 €	1056294 €
2028	- €	- €	125567 €	125567 €	1181861 €
2029	- €	- €	131894 €	131894 €	1313755 €
NPV			1004526.75 €		
Breakeven at			1.51 years		
IRR			240 %		

Escenario 2b:

Con un escenario similar al 2a, pero considerando la retirada de una única radioayuda de tipo NDB los datos que se obtienen son:

Airports business case (Results)															
Savings of disruption costs (constant euro)															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	
RW end #1. Avoided disruptions	0.3	0.4	2.9	4.6	10.5	24.0	31.3	37.3	40.6	44.2	48.0	50.1	52.2	54	
RW end #1. Savings due to avoided DDC	244 €	295 €	2074 €	3254 €	7469 €	17118 €	22252 €	26573 €	28935 €	31466 €	34181 €	35674 €	37190 €	38 €	
RW end #2. Avoided disruptions	0.0	0.0	4.4	6.9	15.7	36.1	46.9	56.0	61.0	66.3	72.0	75.2	78.3	81	
RW end #2. Savings due to avoided DDC	- €	- €	3111 €	4881 €	11203 €	25676 €	33378 €	39860 €	43403 €	47199 €	51272 €	53511 €	55785 €	58 €	
◀ ▶															
Benefits due to EGNOS-enabled network accessibility (constant euro):															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
RW end #1. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
RW end #1. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €	5732 €
RW end #2. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	
RW end #2. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €	8597 €
◀ ▶															
Savings due to nav aids phase-out (constant euro):															
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Navaid #1	0 €	0 €	0 €	85000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €
◀ ▶															

BC Results					
Year	Investments	Periodic cost	Savings	Net savings	Accrued
2020	- €	- €	- €	- €	0 €
2021	- €	- €	- €	- €	0 €
2022	60000 €	- €	5185 €	-54815 €	-54815 €
2023	- €	- €	107464 €	107464 €	52649 €
2024	- €	- €	38000 €	38000 €	90649 €
2025	- €	- €	62123 €	62123 €	152772 €
2026	- €	- €	74959 €	74959 €	227731 €
2027	- €	2000 €	85763 €	83763 €	311494 €
2028	- €	- €	91667 €	91667 €	403161 €
2029	- €	- €	97994 €	97994 €	501155 €
NPV		372232.89 € ■			
Breakeven at		1.51 years ■			
IRR		155 % ■			

Escenario 3:

EBCAST TOOL Airport

[Exit to main menu](#)

Airports business case (1/5)

Airport characteristics

Average percentage of DDC occurrences (%)	<input type="text" value="0.59"/> i
Average percentage of DDC potentially avoidable thanks to EGNOS (%)	<input type="text" value="48.50"/> i
Number of runway ends in the airport	<input type="text" value="4"/>

Period

Period of analysis (from now on years)	<input type="text" value="10"/> i
--	---

Traffic and equipage forecast

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Traffic forecast, movements (baseline) i	<input type="text" value="20000.00"/>	<input type="text" value="21200.00"/>	<input type="text" value="22472.00"/>	<input type="text" value="23820.32"/>	<input type="text" value="25249.54"/>	<input type="text" value="26764.51"/>	<input type="text" value="28370.38"/>
Traffic proportion RW end #1 (%) i	<input type="text" value="20"/>						
Traffic proportion RW end #2 (%) i	<input type="text" value="30"/>						
Traffic proportion RW end #3 (%) i	<input type="text" value="30"/>						
Traffic proportion RW end #4 (%) i	<input type="text" value="20"/>						
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #1 (%) i	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #2 (%) i	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #3 (%) i	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Forecast add. traffic due to EGNOS network accessibility RWY end #4 (%) i	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
% of equipped fleet, forecast (baseline) i	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5.75"/>	<input type="text" value="6.61"/>	<input type="text" value="9.92"/>	<input type="text" value="21.82"/>	<input type="text" value="48.01"/>	<input type="text" value="60.01"/>

Airports business case (2/5)

Investment configuration

Runway end #1

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2023 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Runway end #2

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2023 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Runway end #3

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2023 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Runway end #4

LPV	yes ▾ 
Procedure investment costs (€)	25000.00 
Other associated costs (one-off) (€)	5000.00 
When? (year)	2023 
Periodic costs (€)	1000.00 
Periodic (years)	5 

Airports business case (3/5)

Savings model configuration

Ground-side revenue per movement (€)


Navaid data: CAPEX


DME (k€)
ILS (k€)
ILS/DME (k€)
NDB (k€)
VOR (k€)
VOR/DME (k€)

Navaid data: OPEX


DME (k€)
ILS (k€)
ILS/DME (k€)
NDB (k€)
VOR (k€)
VOR/DME (k€)

Lifetime


Lifetime (years)

Airports business case (4/5)

Savings model configuration

Decommissioning plans

Number of nav aids ▼
Navaid #1 type ▼
- when? (year)
Navaid #2 type ▼
- when? (year)

Airports business case (5/5)

Other economic parameters

Discount rate (without inflation) (%)


Airports business case (Results)

Savings of disruption costs (constant euro)														
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
RW end #1. Avoided disruptions	0.0	0.0	0.0	1.4	3.2	7.4	9.7	11.9	13.2	14.7	16.4	17.5	18.8	20.1
RW end #1. Savings due to avoided DDC	- €	- €	- €	894 €	2084 €	4861 €	6440 €	7851 €	8738 €	9725 €	10824 €	11589 €	12406 €	13283 €
RW end #2. Avoided disruptions	0.0	0.0	0.0	2.0	4.7	11.0	14.6	17.8	19.8	22.1	24.6	26.3	28.2	30.1
RW end #2. Savings due to avoided DDC	- €	- €	- €	1341 €	3126 €	7291 €	9661 €	11776 €	13107 €	14587 €	16237 €	17383 €	18609 €	19924 €
RW end #3. Avoided disruptions	0.0	0.0	0.0	2.0	4.7	11.0	14.6	17.8	19.8	22.1	24.6	26.3	28.2	30.1
RW end #3. Savings due to avoided DDC	- €	- €	- €	1341 €	3126 €	7291 €	9661 €	11776 €	13107 €	14587 €	16237 €	17383 €	18609 €	19924 €
RW end #4. Avoided disruptions	0.0	0.0	0.0	1.4	3.2	7.4	9.7	11.9	13.2	14.7	16.4	17.5	18.8	20.1
RW end #4. Savings due to avoided DDC	- €	- €	- €	894 €	2084 €	4861 €	6440 €	7851 €	8738 €	9725 €	10824 €	11589 €	12406 €	13283 €

Benefits due to EGNOS-enabled network accessibility (constant euro):														
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
RW end #1. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
RW end #1. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	0 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €
RW end #2. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
RW end #2. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	0 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €
RW end #3. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
RW end #3. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	0 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €	2503 €
RW end #4. Delta movs, EGNOS alone	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
RW end #4. Benefits, network accessibility	0 €	0 €	0 €	0 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €	1669 €

Savings due to nav aids phase-out (constant euro):														
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Navaid #1	0 €	0 €	0 €	0 €	85000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €	5000 €
Navaid #2	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	677000 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €	33900 €

BC Results					
Year	Investments	Periodic cost	Savings	Net savings	Accrued
2020	- €	- €	- €	- €	0 €
2021	- €	- €	- €	- €	0 €
2022	- €	- €	- €	- €	0 €
2023	120000 €	- €	4469 €	-115531 €	-115531 €
2024	- €	- €	103766 €	103766 €	-11765 €
2025	- €	- €	37649 €	37649 €	25885 €
2026	- €	- €	722547 €	722547 €	748432 €
2027	- €	- €	86498 €	86498 €	834930 €
2028	- €	4000 €	90934 €	86934 €	921864 €
2029	- €	- €	95869 €	95869 €	1017733 €
NPV		754410.84 €			
Breakeven at		2.31 years			
IRR		131 %			

Anexo D. Prestaciones del servicio EDAS

EDAS publica mensualmente los valores de disponibilidad y latencia para cada uno de sus servicios. Se incluyen a continuación los resultados de los meses correspondiente al primer trimestre de 2020 [Ref.54].

La disponibilidad se mide como el porcentaje de tiempo en el que el servicio envía datos según las especificaciones.

La latencia es el tiempo que transcurre entre la transmisión del último bit del mensaje de navegación por el segmento espacial hasta que los datos salen del sistema EDAS. Es un parámetro de sentido único en aplicaciones en tiempo real. La latencia que se muestra corresponde al percentil 95 de las latencias monitorizadas cada 5 minutos dentro del mes.

EDAS Service		Availability	Latency (ms)
Service Level 0	-	100.00%	554.77
Service Level 2	-	100.00%	559.03
Ntrip Service	-	100.00%	662.58
SISNeT Service ⁴	GEO Operational 1	100.00%	60.90
	GEO Operational 2	99.96%	59.16
Data Filtering Service	RIMS A	100.00%	593.77
	Central	100.00%	455.80
	MEDA	100.00%	580.94
	North-East	99.99%	191.68
	North-West	100.00%	512.94
	South-West	100.00%	504.87
FTP Service	-	100.00%	N/A

Tabla 11. Prestaciones de EDAS en enero de 2020 [Ref.54]

EDAS Service		Availability	Latency (ms)
Service Level 0	-	99.99%	579.10
Service Level 2	-	99.99%	583.59
Ntrip Service	-	100.00%	658.17
SISNeT Service ⁵	GEO Operational 1	99.94%	91.48
	GEO Operational 2	99.94%	82.62
Data Filtering Service	RIMS A	99.99%	755.17
	Central	99.99%	466.18
	MEDA	99.99%	752.38
	North-East	99.99%	228.93
	North-West	99.99%	515.41
	South-West	99.99%	516.31
FTP Service	-	100.00%	N/A

Tabla 12. Prestaciones de EDAS en febrero de 2020 [Ref.54]

EDAS Service		Availability	Latency (ms)
Service Level 0	-	100.00%	647.71
Service Level 2	-	100.00%	648.42
Ntrip Service	-	100.00%	651.84
SISNeT Service ⁵	GEO Operational 1	99.97%	56.35
	GEO Operational 2	99.92%	64.13
Data Filtering Service	RIMS A	100.00%	531.68
	Central	99.99%	464.23
	MEDA	100.00%	519.32
	North-East	99.99%	207.42
	North-West	100.00%	514.90
	South-West	99.99%	501.42
FTP Service	-	100.00%	N/A

Tabla 13. Prestaciones de EDAS en marzo de 2020 [Ref.54]

Los valores obtenidos muestran una disponibilidad superior al 99,9% en todos los casos, mientras que la latencia siempre se mantiene por debajo de los 800 ms, siendo el servicio SISNet el que presenta valores de latencia menores.