



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y validación de procedimientos
SBAS en el Aeropuerto de Alicante
según requerimientos ESSP año 2020**

Autor: José Rizo Cerdán

Tutor: Dr. Israel Quintanilla García

Cotutor: Dr. Pedro Yuste Pérez

Resumen

El presente documento tiene como objetivo realizar una validación de un procedimiento de aproximación conocido como LPV-200 en el aeropuerto de Alicante. Actualmente, este aeropuerto cuenta con un sistema ILS para las fases de aproximación y aterrizaje de una aeronave. El proyecto engloba el empleo de las constelaciones GNSS y el sistema de aumentación SBAS para mejorar las prestaciones hasta alcanzar los requerimientos establecidos para que se pueda navegar empleando tecnología satelital.

Se parte de un estudio teórico que manifiesta la necesidad de los sistemas de aumentación para mejorar las prestaciones GNSS. El sistema empleado es el SBAS que cubre el área europea: EGNOS, el cual establece un servicio conocido como Safety of Life con una garantía de prestaciones para operar mediante procedimientos GNSS. Se ha escogido el procedimiento LPV-200 ya que la efectividad del mismo es igual a la del ILS, y supone una ventaja económica y de infraestructuras frente a él, por lo que de cara al futuro es lógico y probable que lo acabe reemplazando en diferentes partes del mundo.

Para realizar la validación se han desarrollado las dos primeras partes de un conjunto de tres fases. La primera de ellas es una campaña a largo plazo en la cual se ha estudiado las prestaciones de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad para comprobar que cumplan con los mínimos requeridos, mediante informes de EGNOS. La segunda, es una campaña sobre el terreno en la cual se ha estudiado de nuevo las prestaciones de manera más detallada con el empleo del software Pegasus, desarrollado por Eurocontrol.

Finalmente se han obtenido resultados que indican que la validación se puede realizar, teniendo en cuenta que ha habido algunas incidencias en las prestaciones debidas a errores controlados por EGNOS. Tras consultar con ellos, se garantizó que a pesar de los inconvenientes encontrados no existe problema alguno que impida la validación para LPV-200 en el aeropuerto de Alicante a partir de Julio de 2020.

Abstract

The aim of this document is to certificate the Airport of Alicante for performing the approach phase with LPV-200 procedure. Currently, the airport is working with the traditional Instrumental Landing System for approaches and landings. The project involves the use of GNSS constellations and the augmentation System SBAS in order to improve the navigation performances until reaching the requirements that have been defined to navigate with this kind of technology.

Firstly, a theoretical study is developed, explaining the need of the augmentation systems for improving the performances of GNSS. The system used for the project is the one that is currently covering the whole area of Europe: EGNOS, which defines among its different characteristics the service of Safety of Life, including within it the guarantee of performances needed to operate by means of GNSS procedures. The LPV-200 has been chosen due to the fact that its effectiveness is quite similar to the ILS one, and furthermore, it implies a great economical and infrastructure advantage. This are the reasons why it is very logical and probable that GNSS procedures will eventually replace the traditional ILS all around the world.

During the validation process, two out of three phases have been developed. The first one consisted of an assessment of the performances in the long term, where accuracy, integrity, continuity and availability have been studied for a period of six months, in order to check if they fulfil the minimum requirements by attending to the information of EGNOS Monthly Reports. When it comes to the second phase, a short term campaign has been performed to check the performances in a more detailed way by means of the software Pegasus, developed by Eurocontrol.

Finally, results have been obtained, which show that the validation can be performed considering that there have been some incidences regarding to some of the performances due to errors that are under EGNOS control. After consulting with them, it was guaranteed that despite the inconvenients found, there is not any problem preventing that this validation of LPV-200 procedure is developed in Alicante's Airport starting from july, 2020.

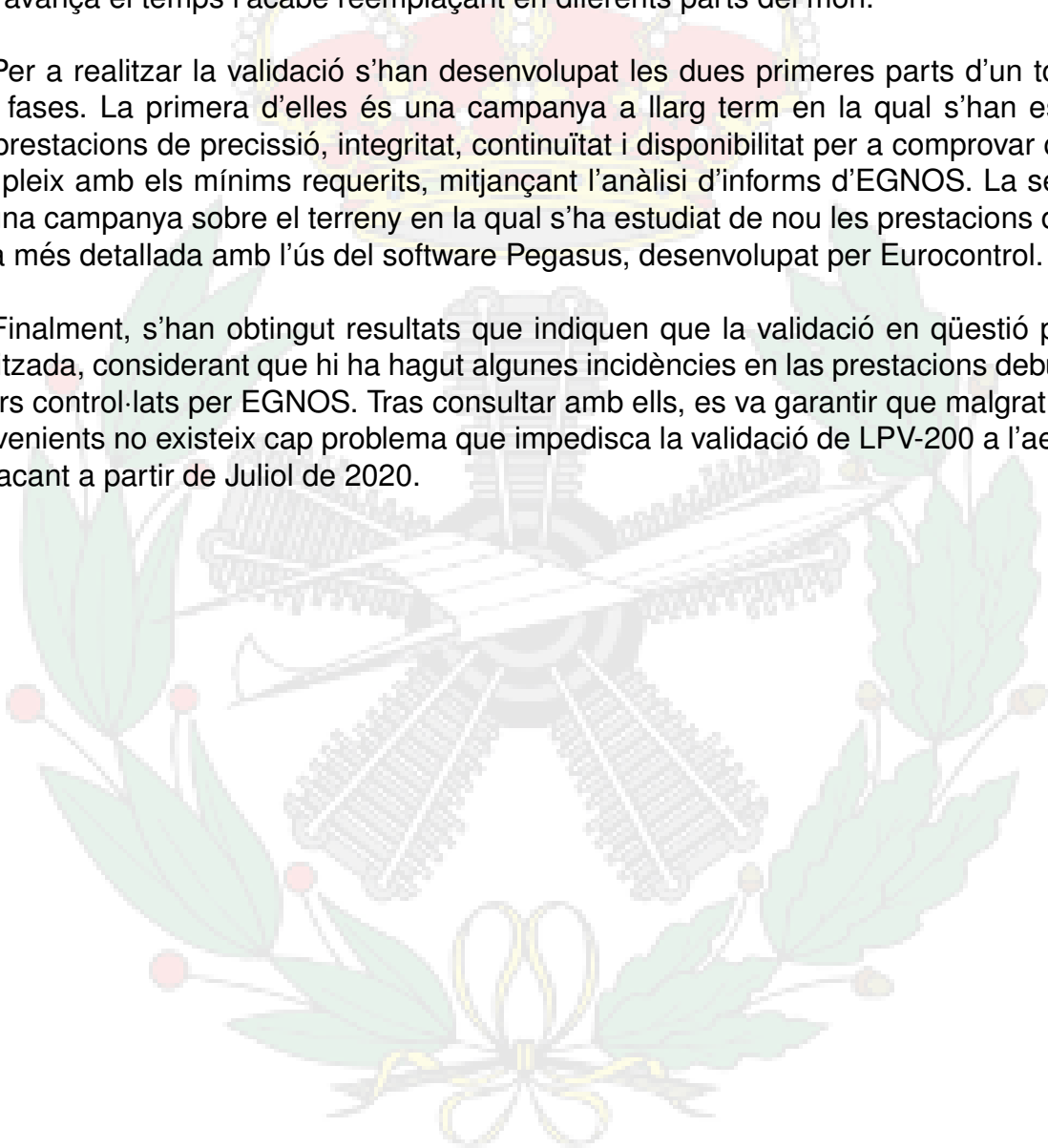
Resum

L'objectiu principal d'aquest document es la realització d'una validació del procediment d'aproximació conegut com LPV-200 a l'aeroport d'Alacant. Actualment, aquest aeroport disposa d'un sistema ILS per a les fases d'aproximació i aterratge d'una aeronau. El projecte engloba l'ús de las constel·lacions GNSS i el sistema d'augmentació SBAS per a millorar les prestacions fins a aconseguir els requeriments establits per que es puga navegar mitjançant la tecnologia satel·lital.

Es comença amb un estudi teòric que expressa la necessitat dels sistemes d'augmentació per a millorar les prestacions GNSS. El sistema empleat és el SBAS que cobreix l'àrea europea: EGNOS, el qual estableix un servei conegut com Safety of Life, amb una garantia de prestacions per operar mitjançant procediments GNSS. S'ha triat el procediment LPV-200 perquè presenta la mateixa eficàcia que el ILS i suposa un avantatge econòmic i d'infraestructures respecte a ell. Per aquests motius, és lògic i probable que a mesura que avança el temps l'acabe reemplaçant en diferents parts del món.

Per a realitzar la validació s'han desenvolupat les dues primeres parts d'un total de tres fases. La primera d'elles és una campanya a llarg term en la qual s'han estudiat les prestacions de precisió, integritat, continuïtat i disponibilitat per a comprovar que es compleix amb els mínims requerits, mitjançant l'anàlisi d'informes d'EGNOS. La segona, és una campanya sobre el terreny en la qual s'ha estudiat de nou les prestacions de manera més detallada amb l'ús del software Pegasus, desenvolupat per Eurocontrol.

Finalment, s'han obtingut resultats que indiquen que la validació en qüestió pot ser realitzada, considerant que hi ha hagut algunes incidències en las prestacions debudes a errors control·lats per EGNOS. Tras consultar amb ells, es va garantir que malgrat els inconvenients no existeix cap problema que impedisca la validació de LPV-200 a l'aeroport d'Alacant a partir de Juliol de 2020.



Agradecimientos

Antes de comenzar con el desarrollo del presente Trabajo Final de Grado me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado durante mi camino en el Grado de Ingeniería Aeroespacial y han hecho posible que complete este proyecto, así como los 4 intensos años que han supuesto mi carrera universitaria.

En primer lugar, agradecer a mi Tutor, D. Israel Quintanilla García, por mostrarme el mundo de la navegación por satélite, con todas las innovaciones y posibilidades que presenta en el sector aeronáutico, así como por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, proporcionándome tanto material como sus conocimientos. Del mismo modo, quiero dar las gracias a mi cotutor, D. Pedro Yuste Pérez, por prestarme su ayuda y conocimientos siempre que lo he necesitado y apoyarme en todo lo que he hecho.

Agradecer también a la Universitat Politècnica de València y en particular a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño por permitirme estudiar el Grado en Ingeniería Aeroespacial para formarme tanto en el ámbito profesional como en el personal. Sin duda el hecho de formar parte de un grupo de alto rendimiento en una carrera de prestigio como esta es una gran aportación de cara a mi futuro.

Del mismo modo, me gustaría dar las gracias a mi familia. A mis padres, por educarme y guiarme hasta ser quien soy ahora, y por mostrarme siempre un gran apoyo y cariño hacia mi y hacia lo que hago. A mi hermano, por ser mi compañero más cercano en todas las etapas de mi vida, en las que siempre nos hemos apoyado.

Me gustaría además agradecer a los contactos de los diferentes organismos que han prestado su ayuda durante el desarrollo del proyecto. A David Duchet, de Eurocontrol, por su ayuda tan efectiva y rápida para el empleo del software; Al equipo de Ana Boderó, de ENAIRE, por orientarme en el tratamiento e interpretación de los resultados; y al equipo técnico de EGNOS quien se mostró disponible para cualquier consulta técnica.

Finalmente, quisiera agradecer a mis compañeros y amigos durante estos años por todas las experiencias vividas hasta este día. Kevin, Humberto, Carlos, Tony, Enrique, Manu, Antonio, Alejandro y Javier. Gracias a todos.

Índice

Agradecimientos	IV
Índice de figuras	VIII
Glosario	X
I. Memoria	1
1. Introducción	2
1.1. Contexto	2
1.2. Objetivos	4
2. Sistemas GNSS	6
2.1. Estructura general	6
2.2. Funcionamiento	7
2.3. GPS	8
2.3.1. Servicios	8
2.3.2. Estructura de señal	8
2.4. GLONASS	9
2.5. Galileo	9
2.5.1. Servicios	10
2.5.2. Estructura de la señal	10
2.6. BeiDou	10
2.6.1. Servicios	11
2.6.2. Estructura de la señal	11
2.7. Sistemas Regionales de Navegación por satélite	11
2.7.1. IRNSS	11
2.7.2. QZSS	12
3. Sistemas de Aumentación	13
3.1. ABAS	14
3.2. GBAS	14
3.3. SBAS	15
3.3.1. Arquitectura	15
3.3.2. Señal SBAS	17
3.3.3. Fundamentos matemáticos	17
3.3.4. Sistemas SBAS Actuales	18
4. EGNOS	20
4.1. Arquitectura	20
4.2. Señal EGNOS	21
4.2.1. Correcciones	21
4.2.2. Estructura de Mensaje	21
4.3. Servicios	24

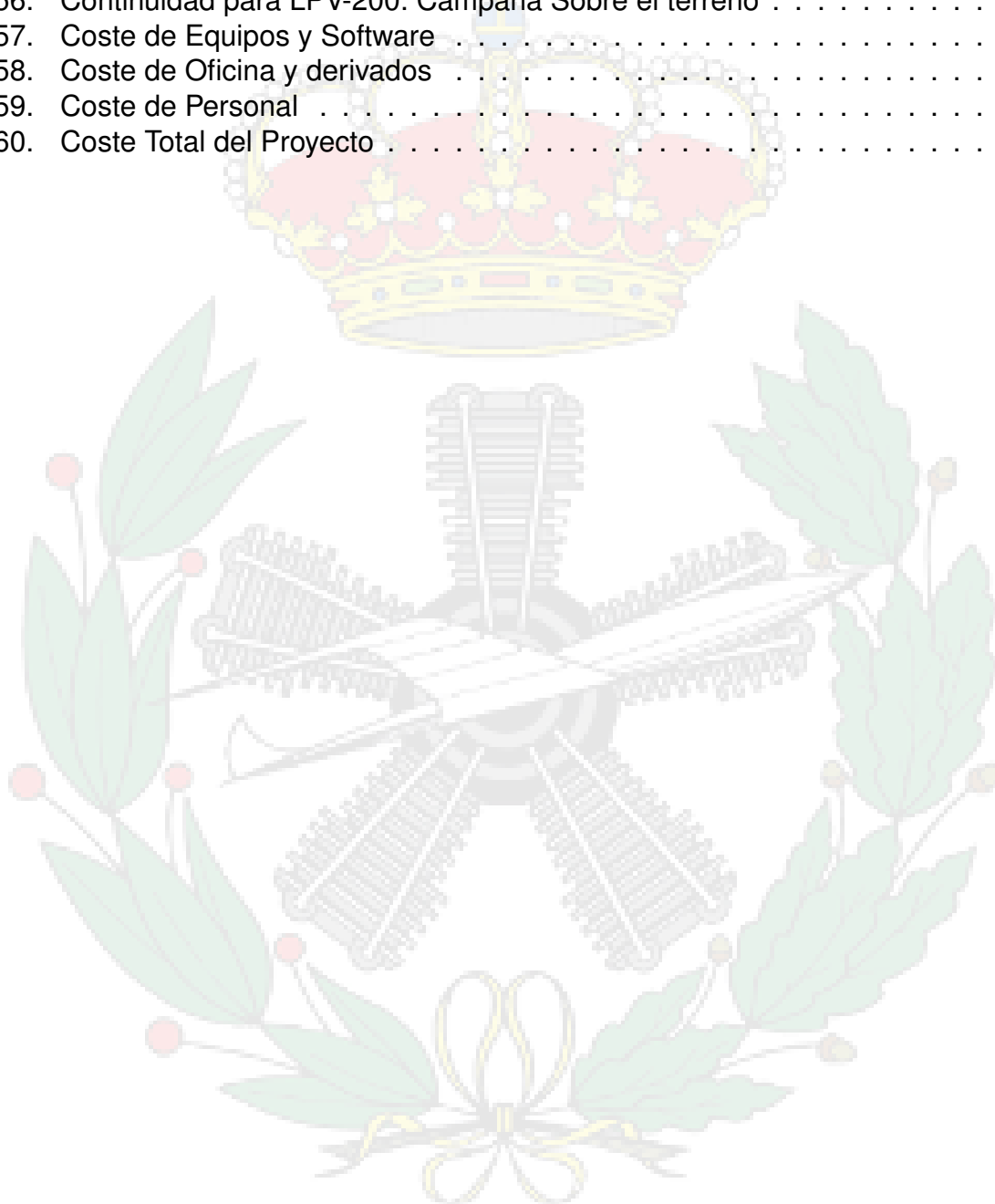
5. Navegación PBN	25
5.1. Especificaciones de Navegación	25
5.2. Especificaciones de navegación en fase aproximación (RNP APCH)	26
5.2.1. Conceptos de Aproximación	27
5.2.2. Clasificación de Procedimientos de Aproximación	27
5.3. LPV-200	29
6. ENAIRE	31
7. Diseño y Validación de procedimientos	32
7.1. Emplazamiento	32
7.2. Requerimientos OACI	33
7.2.1. Disponibilidad	34
7.2.2. Continuidad	35
7.2.3. Precisión	36
7.2.4. Integridad	37
7.3. Fases de validación	39
8. Validación a largo plazo	40
8.1. Disponibilidad	40
8.1.1. Disponibilidad SIS	40
8.1.2. Disponibilidad (de servicio)	40
8.2. Continuidad	41
8.3. Precisión	41
8.4. Integridad	43
9. Validación a corto plazo	44
9.1. Formato de datos	44
9.1.1. Formato RINEX	45
9.2. Obtención de datos	46
9.2.1. Ficheros de Navegación (.N)	46
9.2.2. Ficheros de Observación (.O)	46
9.2.3. Ficheros SBAS (.B)	47
9.3. Estructura de Datos	49
9.4. Tratamiento de datos mediante Pegasus	54
9.4.1. Módulo Convertor	54
9.4.2. Módulo GNSS_Solution	55
9.4.3. Módulo MFileRunner	56
10. Obtención de resultados. Campaña sobre el terreno	58
10.1. Análisis de Precisión	58
10.1.1. Día 14/05/2020	58
10.1.2. Día 15/05/2020	58
10.1.3. Día 16/05/2020	59
10.1.4. Día 17/05/2020	59
10.1.5. Día 18/05/2020	59

10.2. Análisis de Integridad	60
10.2.1. Día 14/05/2020	60
10.2.2. Día 15/05/2020	62
10.2.3. Día 16/05/2020	64
10.2.4. Día 17/05/2020	66
10.2.5. Día 18/05/2020	68
10.3. Análisis de Disponibilidad	71
10.4. Análisis de Continuidad	73
11. Conclusiones	75
II. Pliego de condiciones	77
12. Pliego de condiciones. Introducción	78
13. Condiciones Generales	78
13.1. Supervisión	78
13.2. Conocimientos específicos	78
14. Condiciones técnicas de material y equipamiento	78
14.1. Software	78
14.2. Hardware	79
14.3. Conexión a Internet	79
14.4. Material adicional	79
15. Especificaciones de los sistemas de la Aeronave	80
III. Presupuesto	81
16. Desglose de Presupuesto	82
16.1. Coste de equipamiento y software	82
16.2. Coste de Oficina y derivados	83
16.3. Costes de personal	83
17. Presupuesto Total del Proyecto	84
IV. Anexo de Documentación	85
Referencias	87

Índice de figuras

1.	Mapa de Europa de procedimientos LPV. EGNOS 14/05/2020 [1].	4
2.	Arquitectura de un sistema SBAS. [15]	15
3.	Estructura de los mensajes SBAS-Formato de Datos [22].	22
4.	Tipología de mensajes de EGNOS. [22]	22
5.	Designaciones de especificación de navegación [27].	26
6.	Clasificación de procedimientos de aproximación. [28]	28
7.	Requerimientos de las prestaciones del SoL (OACI) [25].	33
8.	Rendimiento mínimo ofrecido por el SoL de EGNOS [25].	34
9.	Diagrama de Stanford teórico [35].	38
10.	Disponibilidad en (%) de los satélites GEO de EGNOS [36]	40
11.	Disponibilidad LPV-200 en (%).	41
12.	Riesgo de continuidad para LPV-200.	41
13.	Mapa de cobertura GNSS EGNOS. Ubicación de Alicante	42
14.	HNSE y VNSE de la RIM de Palma de Mallorca	42
15.	Índice de seguridad horizontal y vertical. LPV-200	43
16.	Interfaz de Descarga de datos RINEX. IGN.	46
17.	Uso de la herramienta crx2rxn de Hatanaka	47
18.	Interfaz del servidor FTP mediante acceso con WinSCP	48
19.	Empleo del software de concatenación TEQC	49
20.	Archivos a procesar: SBAS, Navegación y Observación	49
21.	Estructura del fichero de observación	50
22.	Estructura del fichero de Navegación	52
23.	Estructura del fichero de SBAS	53
24.	Interfaz del módulo Convertor	54
25.	Interfaz del módulo GNSS.Solution	55
26.	Interfaz del módulo MFileRunner	57
27.	Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 14/05/2020	58
28.	Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 15/05/2020	58
29.	Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 16/05/2020	59
30.	Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 17/05/2020	59
31.	Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 18/05/2020	60
32.	Histograma del HSI para el día 14/05/2020	60
33.	Diagrama de Stanford Horizontal para el día 14/05/2020	61
34.	Histograma del VSI para el día 14/05/2020	61
35.	Diagrama de Stanford Vertical para el día 14/05/2020	62
36.	Histograma del HSI para el día 15/05/2020	62
37.	Diagrama de Stanford Horizontal para el día 15/05/2020	63
38.	Histograma del VSI para el día 15/05/2020	63
39.	Diagrama de Stanford Vertical para el día 15/05/2020	64
40.	Histograma del HSI para el día 16/05/2020	64
41.	Diagrama de Stanford Horizontal para el día 16/05/2020	65
42.	Histograma del VSI para el día 16/05/2020	65
43.	Diagrama de Stanford Vertical para el día 16/05/2020	66

44.	Histograma del HSI para el día 17/05/2020	66
45.	Diagrama de Stanford Horizontal para el día 17/05/2020	67
46.	Histograma del VSI para el día 17/05/2020	67
47.	Diagrama de Stanford Vertical para el día 17/05/2020	68
48.	Histograma del HSI para el día 18/05/2020	68
49.	Diagrama de Stanford Horizontal para el día 18/05/2020	69
50.	Histograma del VSI para el día 18/05/2020	69
51.	Diagrama de Stanford Vertical para el día 18/05/2020	70
52.	Cálculos de disponibilidad SIS. Campaña Sobre el terreno	71
53.	Disponibilidad de servicio LPV-200 para el 14/05/2020 [1]	72
54.	Disponibilidad de servicio LPV-200. Campaña Sobre el terreno	72
55.	Continuidad LPV-200 para el 14/05/2020 [1].	73
56.	Continuidad para LPV-200. Campaña Sobre el terreno	73
57.	Coste de Equipos y Software	82
58.	Coste de Oficina y derivados	83
59.	Coste de Personal	83
60.	Coste Total del Proyecto	84



Glosario

ABAS Aircraft Based Augmentation System.

AL Alert Limit.

APV Approach Procedure With Vertical Guidance.

ARNS Aeronautical Radio Navigation Services.

ATS Air Traffic Services.

CDMA Code Division Multiple Access.

CPF Control Process Facility.

DA Decision Altitude.

DME Distance Measurement Equipment.

EC European Commission.

EDAS EGNOS Data Access Service.

EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service.

ESA European Space Agency.

ESSP European Satellite Services Provider.

ETRS89 European Terrestrial Reference System 1989.

FAA Federal Aviation Agency.

FDE Fail Detection and Exclusion.

FDMA Frequency Division Multiple Access.

FTP File Transfer Protocol.

GBAS Ground Based Augmentation System.

GDOP Geometric Dilution of Precision.

GIC GNSS/Ground Integrity Channel.

GLONASS Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema.

GNSS Global Navigation Satellite System.

GPS Global Position System.

HAL Horizontal Alert Limit.

HAS High Accuracy Service.

HNSE Horizontal Navigation System Error.

HPL Horizontal Protection Limit.

HSI Horizontal Safety Index.

ICAO International Civil Aviation Organization.

IGN Instituto Geográfico Nacional.

IGS International GNSS Service.

ILS Instrumental Landing System.

IRNSS Indian Regional Navigational Satellite System.

LEAL "Lima Echo Vector Lima". Código OACI Aeropuerto Alicante.

LNAV Lateral Navigation.

LP Localizer Performance.

LPV Localizer Performance with Vertical Guidance.

MCC Master Control Center.

MTSAT Multifuncional Transport Satellites.

NAVIC Navigation Indian Constellation.

NLES Navigation Land Earth Stations.

NPA Non Precision Approach.

NSE Navigation System Error.

NTRIP Network Transport of RTCM via Internet Protocol.

OACI Organización de Aviación Civil Internacional.

OS Open Service.

PA Precision Approach.

PBN Performance Based Navigation.

PE Position Error.

PL Protection Level.

PPS Precise Positioning Service.

PRC Pseudo-Range Corrections.

PRN Pseudo Random Noise.

PRS Public Regulated Service.

QZSS Quasi-Zenith Satellite System.

RAIM Receiver Autonomous Integrity Monitoring.

RINEX Receiver Independent Exchange Format.

RNAV Area Navigation.

RNP Required Navigation Performance.

RRC Range Rate Corrections.

RTCA Radio Technical Commission for Aeronautics.

RTCM Radio Technical Commission for Maritim Services.

SAR Search And Rescue (service).

SBAS Satellite Based Augmentation System.

SCF Satellite Control Facility.

SID Standard Initial Departure.

SIS Signal In Space.

SoL Safety of Life (service).

SPS Standard Positioning Service.

STAR Standard Terminal Arrival Route.

TFG Trabajo Final de Grado.

TMA Terminal Maneuvering Area.

TTA Time To Alert.

VAL Vertical Alert Limit.

VHF Very High Frequency.

VNAV Vertical Navigation.

VNSE Vertical Navigation System Error.

VOR VHF Omni-directional Range.

VPL Vertical Protection Limit.

VSI Vertical Safety Index.

WAAS Wide Area Augmentation System.

WAD Wide Area Differential.

WGS84 World Geodetic System 1984.





1. Introducción

1.1. Contexto

Desde comienzos del siglo XX, la aviación ha evolucionado rápidamente hasta convertirse en uno de los medios de transporte de personas y mercancías más comunes y efectivos en todo el mundo. Esta evolución ha conllevado también una mejora en el ámbito técnico que se halla tras este sector, de manera que se puedan emplear aeronaves de la forma más efectiva y segura.

El objeto de este TFG se ubica dentro del campo de la navegación aérea, el cual engloba todo aquello que permite la gestión del tráfico de aeronaves así como el proceso de guiado, para garantizar la seguridad y buena operabilidad de las mismas. En este sector, el organismo más relevante a nivel internacional que proporciona las diferentes reglas y regulaciones es la OACI (Organización Civil de Aviación Internacional) o ICAO, en inglés. Dentro de dicho campo, se hará hincapié en la navegación aérea entorno a los aeropuertos, y concretamente se particularizará para uno de ellos: El aeropuerto de Alicante, España, cuya clave establecida por la OACI es: LEAL.

Para todas las operaciones que se pueden realizar en un aeropuerto, una garantía de navegación que cumpla con los requisitos de seguridad y eficiencia de tránsito es de vital importancia. Una de estas operaciones, en la cual una buena precisión es de gran relevancia, es la denominada fase de aproximación.

Tradicionalmente, la aproximación de aeronaves a un aeropuerto para su aterrizaje se ha realizado mediante un sistema conocido como ILS, el cual proporciona:

- **Guiado vertical**, a través de una radiobaliza que permite al piloto seguir una senda de planeo de pendiente regulada por la OACI.
- **Guiado horizontal**, a través de un localizador que permite al piloto conocer su posición horizontal con respecto al eje longitudinal de la pista.

La precisión y eficacia del ILS son elevadas, y por ello actualmente sigue siendo un sistema empleado en todo el mundo. Sin embargo, la implementación de dicho sistema resulta elevada en términos de costes, por lo que a día de hoy se sigue tratando de conseguir reemplazar los ILS por otros sistemas que proporcionen unas características similares pero a un precio más económico.

Una de las soluciones que se ha planteado en los últimos años para solventar este inconveniente es el uso de tecnología satelital en la navegación aérea. Así, han surgido los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), los cuales emplean la información medida por constelaciones de satélites para proporcionar un posicionamiento bastante preciso empleando receptores y subsistemas relativamente más baratos. Además, sus infraestructuras resultan más fáciles de mantener y ofrecen mejores prestaciones en condiciones meteorológicas adversas, lo cual podría dar lugar a una mayor precisión que

el ILS en un futuro.

Actualmente, los diferentes países o continentes han desarrollado constelaciones de satélites para proporcionar cobertura satelital a todo su territorio, de las cuáles se hablará de manera más detallada durante el transcurso de este trabajo. Estados Unidos construyó la constelación GPS, usada comúnmente en muchos dispositivos cotidianos. Rusia, por su parte, desarrolló como contrapartida GLONASS. En el caso de Europa, se está desarrollando la constelación GALILEO, cuya infraestructura sigue a día de hoy sin estar finalizada.

La información que proporcionan estas constelaciones puede ser suficiente para el uso de GPS con un teléfono móvil o un navegador de un vehículo. No obstante, las prestaciones que se ofrecen con las infraestructuras mencionadas son insuficientes para cumplir con los requerimientos que la OACI establece para garantizar la correcta operabilidad y seguridad al usar los sistemas GNSS en el terreno de la aviación. Estos requisitos son los que engloba el concepto PBN o Navegación Basada en Requerimientos. Mediante este concepto se establece que para que una aeronave pueda navegar empleando sistemas de navegación GNSS ésta debe cumplir con unos estándares de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

Para poder cumplir con estas pautas, se han desarrollado los denominados sistemas de aumentación, los cuáles constituyen una infraestructura capaz de proporcionar la información necesaria a las aeronaves dentro de unos límites determinados por la OACI. En este trabajo se empleará el Sistema de Aumentación Basado en Satélite (SBAS), que es la infraestructura que mayormente se utiliza en aeropuertos de distintos lugares del mundo. Concretamente, se hará uso del sistema SBAS Europeo, conocido como EGNOS. Mediante el empleo de este sistema lo que se trata de hacer es certificar aeropuertos para que puedan realizar el proceso de aproximación y aterrizaje siguiendo diferentes procedimientos como por ejemplo el LPV-200, que consiste en una aproximación equivalente a un ILS de categoría I, pero empleando los sistemas GNSS.

Una vez definido el entorno de trabajo, cabe mencionar que Estados Unidos se encuentra actualmente al frente de la navegación GNSS, pues la mayoría de sus aeropuertos ya han sido validados. En el ámbito europeo, en los últimos años se ha comenzado a validar los diferentes aeropuertos, entre ellos algunos españoles. Todos estos conceptos relacionados con las constelaciones y sistemas GNSS se profundizarán en secciones posteriores, de manera que se clarifiquen todos los procedimientos a seguir para cumplir con los objetivos de este TFG.

En la Figura 1 se puede apreciar un mapa extraído de la herramienta de procedimientos LPV de EGNOS, portal del que se ha obtenido información para distintos procedimientos [1].

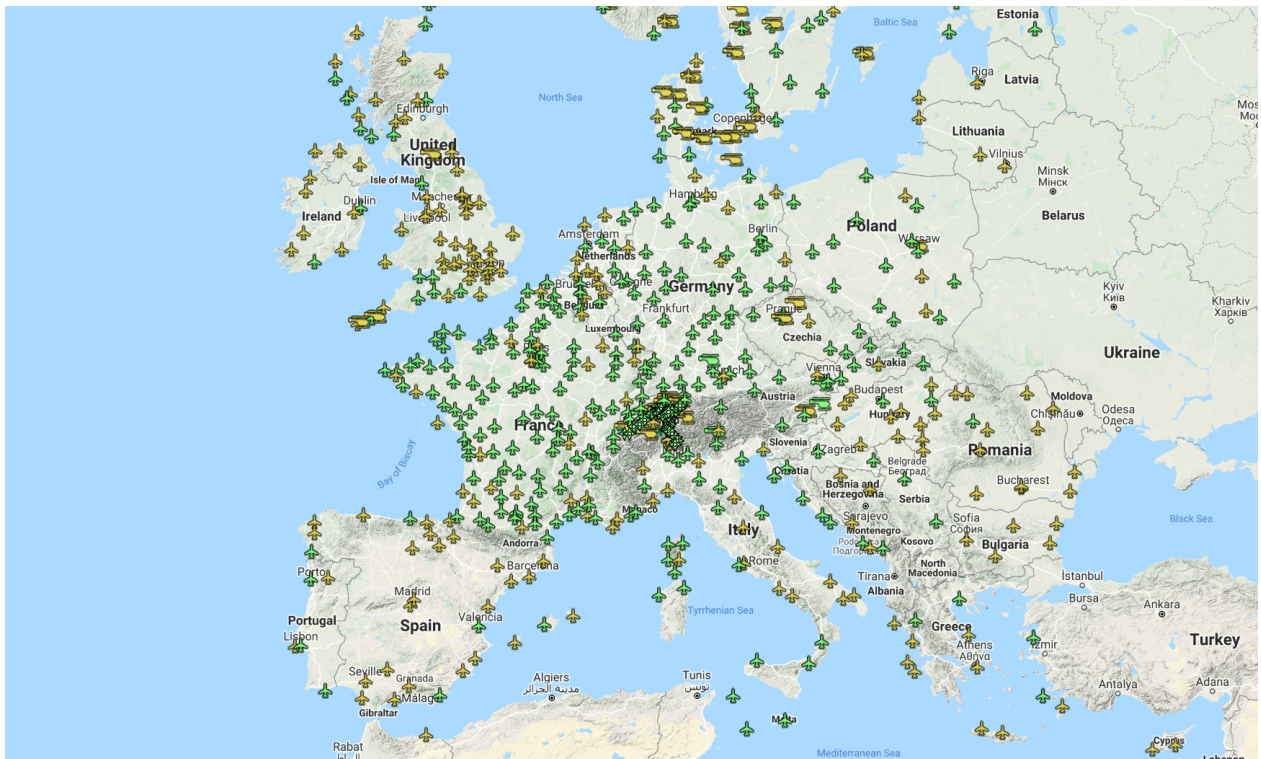


Figura 1: Mapa de Europa de procedimientos LPV. EGNOS 14/05/2020 [1].

En el mapa en cuestión, se puede apreciar como hay un gran número de aeropuertos que ya se han validado para procedimientos LPV, representados por aviones de color verde, sobre todo en la parte de Europa Central. En lo referente a España, algunos aeropuertos como Valencia, Santander o Málaga ya han sido validados, pero la gran mayoría se encuentran en estado de «planeados», representados por aviones de color amarillo, los cuales se estima que se validarán durante los próximos años.

El aeropuerto de Alicante, por su parte, está planeado para su validación en este mismo año 2020. El organismo encargado de realizar dicha tarea será ENAIRE, el cual se encarga de la gestión de navegación aérea en España.

1.2. Objetivos

Una vez se ha clarificado el entorno en el cuál se va a desarrollar el presente trabajo, se definirán los objetivos del mismo.

En primer lugar, se realizará un estudio teórico de las tecnologías GNSS, las constelaciones de satélites y los sistemas de aumentación, profundizando en el sistema SBAS. Del mismo modo, se estudiarán requerimientos y procedimientos necesarios para la validación de un proceso de navegación LPV-200 siguiendo las pautas determinadas por la OACI y por tanto atendiendo a los criterios de la navegación basada en requerimientos: precisión, integridad, continuidad y disponibilidad.

Esta investigación teórica será la base sobre la cual se asentará el objetivo principal de este TFG: la simulación y análisis del proceso de certificación del sistema EGNOS para el aeropuerto de Alicante. Dicho procedimiento de validación consta de tres fases:

- **Fase 1.** Validación a largo plazo
- **Fase 2.** Validación a corto plazo / campaña sobre el terreno.
- **Fase 3.** Validación mediante ensayo de Vuelo

El objeto de este TFG abarcará la realización de las dos primeras fases, para las cuales se emplearán distintos softwares y herramientas online proporcionadas por organismos como EGNOS o Eurocontrol. Por tanto se diseñará el proyecto de manera que abarque las validaciones a largo y corto plazo, las cuales se definirán y estudiarán posteriormente.

En resumen, se tratará de asentar un diseño que constituya una primera parte del proceso de validación del procedimiento LPV-200 para el aeropuerto de Alicante. Así mismo, cabe mencionar que se emplearán los datos de una de las estaciones receptoras de datos GNSS que hay en España, ubicada en el puerto de Alicante, como referencia, puesto que al tratarse de un trabajo no regulado por ningún organismo o empresa competente en la materia no se puede realizar la toma de datos en el propio aeropuerto.

Además, se trabajará contrastando los resultados con el departamento encargado de realizar este tipo de validaciones en ENAIRE, el cual se ha ofrecido para prestar su ayuda con respecto a cualquier problema o inconveniente en el tratamiento de datos del proceso de validación. Actualmente, dicho departamento está desarrollando un proyecto de validación de todo el área de la TMA de Valencia, dentro de la cual se encuentra el aeropuerto de Alicante, por lo que son el organismo adecuado al que realizar cualquier tipo de consulta dentro de este campo.

Finalmente, cabe mencionar que el desarrollo de este TFG viene motivado e inspirado por los conocimientos adquiridos sobre la navegación por satélite durante el transcurso del grado en ingeniería aeroespacial. Para la realización del mismo, se ha procedido a apoyarse en otros Trabajos de Fin de Grado realizados anteriormente sobre la materia, incluidos en las referencias [2] y [3].

2. Sistemas GNSS

El concepto GNSS hace referencia a todos aquellos sistemas de navegación satelital capaces de proporcionar al usuario posicionamiento geoespacial. El servicio que se otorga es global y para ello se desarrollan las denominadas constelaciones de satélites, de manera que sus diferentes ubicaciones entorno a las órbitas terrestres permitan una cobertura alrededor de todo el planeta. Las diferentes naciones o continentes han desarrollado sus propias constelaciones con este propósito. En el presente capítulo se tratará de analizar las características de las constelaciones que existen actualmente entorno al planeta Tierra, viendo similitudes y diferencias entre ellas, para un mejor entendimiento de diferentes conceptos que habrá que considerar de cara al desarrollo del procedimiento de validación.

2.1. Estructura general

La estructura de las constelaciones GNSS sigue un esquema fijo, como se puede observar en las referencias [4] y [5].

- **Segmento espacial.** Hace referencia al conjunto de satélites de la constelación. Es por tanto una infraestructura de vehículos espaciales que mediante su distribución en diferentes planos orbitales trata de conseguir la cobertura global mencionada. El funcionamiento de dichos satélites radica en la recepción de señal por parte del segmento de control para proporcionar en todo momento información de posición mediante coordenadas cartesianas a cualquier usuario o receptor.
- **Segmento terrestre/Segmento de control.** Sector encargado de aplicar las correcciones necesarias a las órbitas, relojes y osciladores de los satélites. Dichas correcciones se conocen como efemérides, cuya precisión permite el cálculo preciso que caracteriza a las constelaciones GNSS. Esta infraestructura se subdivide en diferentes centros o estaciones:
 - Instalaciones de control de satélites (SCF), las cuales se encargan de comprobar que los satélites funcionen correctamente mediante el envío de correcciones que mejoren su funcionamiento.
 - Las Estaciones de Monitoreo de distancia e integridad (RIMS), donde se procesa la información recibida de los satélites y se generan correcciones que permitan mejorar la precisión de los mismos.
 - Centro de Telemetría, seguimiento y control (TT&C), responsable de garantizar que las transmisiones se realizan de manera correcta. Engloba toda la infraestructura de telecomunicaciones del segmento de control.
- **Segmento usuario** Finalmente el segmento usuario engloba a todos aquellos sistemas receptores de la señal GNSS. Estos receptores, además de recibir la información mediante una antena GNSS, se encargan también de resolver las ecuaciones

recibidas y calcular por tanto su posición en tiempo real, como ocurre por ejemplo en el caso de una aeronave.

2.2. Funcionamiento

Los sistemas GNSS se basan en el cálculo de posicionamiento a partir del empleo de sistemas de referencia inerciales. Estos sistemas son modelos matemáticos estandarizados a nivel global que permiten representar el geode terrestre. El más empleado en todo el mundo es el modelo WGS84 (World Geodetic System 1984), un estándar universal en el campo de la navegación y cartografía que permite georreferenciar la Tierra en coordenadas cartesianas (x,y,z) . El modelo matemático resultante es el de un elipsoide que se adapta a los desniveles superficiales que presenta el geode terrestre. Sin embargo, el WGS84 se reemplaza en Europa por un modelo muy similar que resulta compatible. Se trata del ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989).

El objetivo de las constelaciones es proporcionar información de posicionamiento en tiempo real, para ello se han utilizado varios modelos matemáticos a lo largo de la breve historia de la navegación satelital. Un método tradicional fue el cálculo de posición mediante desplazamientos de frecuencia, conocido comúnmente como efecto Doppler de las señales. Sin embargo este método no es el más exacto ya que presenta un error bastante considerable. Por esta razón es por la que actualmente uno de los métodos más empleados es la denominada trilateración esférica [6], método derivado de la triangulación esférica. Este procedimiento matemático es utilizado por constelaciones como GPS, y su funcionamiento radica en lo siguiente:

1. En primer lugar, se emplean tres satélites para proporcionar la información deseada, de forma que se trazan esferas con centro situado en el satélite y radio igual a la distancia del mismo al receptor, conocida como variable « ρ ». De este modo, la intersección de las tres esferas plantea un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas que proporciona en su resolución la información de posición en forma de coordenadas cartesianas (x,y,z) .
2. Este cálculo de posición, no obstante, puede verse afectado por una serie de factores o errores que pueden resultar en un mal funcionamiento del sistema. El reloj del receptor ubicado en la Tierra suele tener una precisión inferior a los relojes de los satélites. Este hecho provoca que la distancia calculada ρ no sea la distancia verdadera entre satélite y receptor. Es por esta razón por lo que se emplea un cuarto satélite, de manera que el sistema tenga redundancia y aparezca entonces el parámetro σ , que es la desviación del reloj del receptor respecto al sistema de tiempo presente en la constelación GNSS. Así pues se pasa a hablar de pseudodistancias, ya que como se ha mencionado las distancias medidas no son las verdaderas. Este método permite reducirlos errores de reloj y sistemáticos.
3. Finalmente, se debe tener en cuenta que la reducción o eliminación de los errores es posible siempre y cuando la geometría satelital lo permita. Esto quiere decir que los satélites deben tener una distribución óptima con respecto al receptor, lo cual

se mide con un parámetro denominado GDOP (Geometric Dilution Of Precision). Así, un mayor grado de cercanía entre los distintos satélites puede acarrear una mayor área de incertidumbre en la cobertura global, traduciéndose en una menor precisión.

Una vez explicadas las características a nivel estructural y funcional de las constelaciones GNSS, se pasará al análisis de las mismas, haciendo hincapié en la constelación GPS, que es la que se utilizará para la toma de datos de navegación y observación en las fases de validación del procedimiento LPV-200 que pretende conseguir este proyecto.

2.3. GPS

La constelación GPS [7] (Global Positioning System) fue desarrollada en Estados Unidos a partir de los años 70. Hoy en día es la constelación GNSS más importante a nivel mundial, ya que desde el año 2000 se eliminó la restricción conocida como disponibilidad selectiva, la cual impedía que otras naciones pudiesen hacer uso de sus servicios debido a las confrontaciones políticas que caracterizaron la segunda mitad del siglo XX. Actualmente cuenta con 24 satélites distribuidos en 6 planos orbitales inclinados 55° con respecto al plano ecuatorial. Esta distribución permite que se cumpla con el GDOP y que por tanto todos los puntos del planeta estén cubiertos por al menos 4 satélites.

2.3.1. Servicios

- **Servicio de Posicionamiento Estándar SPS.** Es un servicio que proporciona posicionamiento en tiempo real de uso civil, es decir, accesible al público. Emplea la frecuencia L1, la cual contiene un código específico de tipo «Coarse/acquisition» y un mensaje con datos de navegación.
- **Servicio de Posicionamiento Preciso PPS.** Servicio de mayores prestaciones enfocado al uso militar. Además de proporcionar posición a tiempo real, ofrece también información de velocidad. Utiliza las frecuencias L1 y L2, las cuales incluyen un código de precisión junto a un mensaje de navegación encriptado.

2.3.2. Estructura de señal

Los satélites GPS transmiten su señal empleando el acceso mediante división de código (CDMA) en dos frecuencias, denominadas L1 y L2. La señal portadora principal es L1, que opera a una frecuencia de 1575.42 MHz y está modulada por dos códigos: el «Coarse/acquisition (C/A)», también denominado código civil, y el «precision/secure (P/Y)» reservado para usos restringidos de organismos que requieren mayores prestaciones. Por su parte, la frecuencia L2, que opera a 1227.6 MHz, solo cuenta con el código de precisión y por tanto se emplea como una segunda frecuencia que permita dar redundancia al código (P/Y) de la frecuencia L1.

Además, desde 2005 se inició un programa de modernización mediante el cual se instalaron una serie de frecuencias nuevas para mejorar ambos códigos y sus servicios. Así, se han añadido las frecuencia L2C y L5 para uso civil y una señal militar (M) que sirve para reforzar los problemas de interferencias o «jamming».

2.4. GLONASS

GLONASS es el sistema GNSS que desarrolló Rusia a partir de 1983 como contrapartida al surgimiento del GPS americano [8]. Sin embargo, durante los años siguientes a su comienzo hubo una serie de problemas económicos que no permitieron que GLONASS se desarrollara en su totalidad. No fue hasta a partir de 2003 donde experimentó un proceso de modernización para convertirse en la constelación de satélites que es actualmente.

De manera análoga al GPS, GLONASS presenta 24 satélites, con la variante de que estos se reparten en 3 planos orbitales en lugar de 6. De este modo se tiene 8 satélites, separados 45° de latitud entre sí, distribuidos en 3 planos distintos con inclinación de 64.8° .

Los satélites utilizan el sistema de acceso mediante división de frecuencia (FDMA), en lugar del CDMA que utiliza GPS, lo cual significa que la información de navegación se transmite en la propia frecuencia portadora de la señal. Emplean dos bandas de frecuencia principalmente: la G1, de 1.6 GHz y la G2, de 1.25 GHz, aunque mediante el proceso de modernización se está desarrollando una nueva frecuencia de trabajo conocida como G3, que puede proporcionar una mayor funcionalidad a la constelación.

Los servicios que proporciona son idénticos a GPS (PPS y SPS), reservando una banda de frecuencias a uso militar encriptado y dejando el resto disponible para uso civil.

2.5. Galileo

La iniciativa denominada Galileo constituye un programa europeo para constituir una constelación GNSS moderna y eficaz [9]. La característica principal que diferencia a Galileo del resto de constelaciones es que su objetivo es proporcionar un servicio de altas prestaciones exclusivamente para el uso y control civil, de manera que se consiga así independencia de los servicios GPS y GLONASS, ligados al control militar. La constelación todavía se encuentra en fase de desarrollo y se espera que cuando todos los sistemas se terminen de implementar Galileo contará con un total de 30 satélites distribuidos en 3 planos orbitales con inclinación de 56° respecto al ecuador.

2.5.1. Servicios

Es en este campo donde Galileo pretende resaltar, proporcionando una variedad de servicios que otras constelaciones actualmente no poseen o tienen en proceso de desarrollo. Los servicios que Galileo podrá ofrecer una vez esté totalmente operativo son:

- **Servicio Abierto (OS).** Servicio accesible a cualquier usuario, enfocado a los grandes mercados. Proporciona información acerca de la posición y un servicio de navegación para vehículos terrestres con un error de precisión de aproximadamente 1 metro.
- **Servicio Público Regulado (PRS).** Servicio de mayor seguridad y restricción a través del encriptado de mensaje. Se empleará para aplicaciones que requieran de mayor prestaciones de continuidad tales como infraestructuras de seguridad dentro de campos como la energía, finanzas, etc.
- **Servicio de Búsqueda y Rescate (SAR).** Permitirá la búsqueda a nivel global de señales de balizas para proporcionar un servicio de rescate coordinado que además permita transmitir mensajes a las personas que lo necesiten.
- **Servicio de alta precisión (HAS).** Denominado en primera instancia Servicio Comercial, es un servicio complementario al OS que presenta una señal de navegación adicional en otra banda de frecuencia. Está enfocado en empresas que pretendan desarrollar sus productos dentro del campo de la navegación.
- **Safety of Life (SOL).** Servicio que pretende extender las prestaciones de navegación del OS para poder emplearse en la navegación aérea de manera conjunta con el sistema de aumentación EGNOS.

2.5.2. Estructura de la señal

Galileo opera en un rango de frecuencias similar a GPS. Las 4 bandas de frecuencia que utiliza se denominan E6, E5a, E5b, y E1; encontrándose las tres últimas dentro de una banda de frecuencia de navegación por satélite destinada a la aviación civil, conocida como ARNS (Aeronautical Radio Navigation Services).

2.6. BeiDou

BeiDou es un sistema de navegación por satélite diseñado en China que actualmente se encuentra en la fase final de su desarrollo [10]. Una vez completado, será capaz de proporcionar servicios de posicionamiento y navegación a tiempo real de manera continua por todo el mundo.

En una primera instancia, la constelación era de carácter regional y proporcionaba cobertura a la zona de Asia y parte del Pacífico con 10 satélites, siendo 5 de ellos geostacionarios. Se han ido agregando más satélites en diferentes fases hasta llegar a un

total de 35, los cuales ya permitirán la cobertura global del sistema.

2.6.1. Servicios

Los servicios que presta la constelación de BeiDou son [11]:

- **Servicio Abierto.** Proporciona posición, velocidad y tiempo de manera similar al a GPS y al OS de Galileo. Del mismo modo, es un servicio libre accesible a cualquier usuario.
- **Servicio Autorizado.** Como su nombre indica será un servicio específico para tareas complejas que requieran de mejores prestaciones que el servicio abierto. También es de carácter global.
- **Servicios Diferenciales de Área Extensa.** Servicio de carácter regional con error de precisión entorno a 1 metro, a utilizar abiertamente por la población de China.
- **Servicios de mensajería corta.** Servicio de mensajes breves para intercambiar información entre la estación y el usuario del propio servicio.

2.6.2. Estructura de la señal

Las frecuencias que usará BeiDou se hayan en las mismas bandas que galileo: E6, E5a, E5b y E1. Este hecho puede implicar una ventaja a la hora de diseñar los receptores, pero conlleva el inconveniente que pueda acarrear interferencias en la información transmitida de ambas constelaciones.

2.7. Sistemas Regionales de Navegación por satélite

Existen dos sistemas de navegación satelital que por el momento presentan servicios únicamente a nivel regional, estos son el IRNSS y el QZSS.

2.7.1. IRNSS

El IRNSS o NAVIC es una constelación desarrollada en la India con el objetivo de proporcionar cobertura a nivel regional y estando controlada exclusivamente por el propio país [12]. El proyecto contará con un total de 7 satélites operativos cuando complete su fase de implementación.

NAVIC proporcionará un servicio de posicionamiento especial y otro de mayor precisión reservado a un uso restringido. Ambos servicios transmitirán sus mensajes en las bandas L5 (1176.45 MHz) y S (2492.08 MHz).

2.7.2. QZSS

El sistema QZSS, desarrollado por Japón, es un proyecto regional que dará cobertura a la zona del este asiático y a Oceanía [13]. Para ello, se estima llegar a una cifra total de 7 satélites, estando varios de ellos en órbitas de alta inclinación para conseguir que la cobertura se centre principalmente en el área de Japón.

Por el momento se estudian una amplia posibilidad de bandas de transmisión para conseguir proporcionar 4 servicios relacionados con el posicionamiento (servicios abiertos y de mayor precisión) y uno de ellos con la mensajería corta, de manera analoga a las constelaciones anteriores.



3. Sistemas de Aumentación

Las prestaciones de los sistemas GNSS permiten emplearlos para diferentes usos, pero resultan insuficientes para aplicarlos a la navegación aérea por sí solos. Ante esta adversidad, surge el concepto de sistema de aumentación, una infraestructura que permitirá alcanzar las prestaciones o requerimientos que OACI exige para que se pueda utilizar la navegación por satélite de manera segura y cumpliendo con todos los estándares.

Los sistemas de aumentación además de proporcionar una mejor precisión que las constelaciones, deben garantizar también que se hallarán operativos o disponibles durante todo el proceso, ya que un fallo del sistema podría acarrear graves consecuencias tales como accidentes aéreos. En base a esta necesidad OACI define los denominados requerimientos de la navegación basada en prestaciones (PBN), de los cuales se realizará un estudio exhaustivo en el capítulo 7, para establecer los criterios a seguir durante la validación.

De este modo, se consideran 4 conceptos [14]:

- **Precisión.** La precisión medida o estimada de cualquier vehículo en un tiempo dado es el grado de conformidad que existe entre el valor calculado o estimado con respecto a la posición, velocidad y tiempo reales. Es un parámetro estadístico que requiere por tanto que se exprese en términos de probabilidad. Un ejemplo común de muestreo de precisión es el uso del percentil. Este parámetro por tanto aludirá a que el porcentaje dado de posiciones calculadas tendrá un error de precisión igual o inferior al valor establecido por el organismo competente, en este caso la OACI.
- **Disponibilidad.** Es el porcentaje de tiempo que los servicios del sistema de aumentación están operativos para su uso. Se mide a través de dos parámetros: la disponibilidad como tal mide la capacidad del sistema de proporcionar un servicio utilizable dentro de un área de cobertura específica; y la disponibilidad de señal alude al porcentaje de tiempo en el cual se encuentran disponibles las señales de navegación procedentes de fuentes externas.
- **Continuidad.** La continuidad se define como la habilidad que tiene un sistema de cumplir su función sin interrupciones durante el transcurso de cualquier operación.
- **Integridad.** Finalmente la integridad hace referencia a la capacidad del sistema de funcionar correctamente y que por tanto la información que proporcione sea confiable. Esta prestación también engloba la característica de que en el caso de que el sistema no proporcione la información correcta y por tanto no sea utilizable para la navegación, proporcione alertas o avisos al usuario para que este sepa que no debe usarlo.

Además de proporcionar las mejores prestaciones posibles, los sistemas de aumentación permiten aplicar correcciones en las medidas de pseudodistancia, tal y como se ha dicho en la sección 2.2. Actualmente existen tres sistemas de aumentación: el ABAS,

GBAS y SBAS, que se explicarán en las siguientes secciones, profundizando lógicamente en el SBAS que es el sistema que se va a utilizar para la validación de este proyecto.

3.1. ABAS

El sistema ABAS (Aircraft Based Augmentation System) es un sistema en el cual la aumentación tiene lugar en la propia aeronave ya que esta cuenta con sensores y demás equipamiento necesario para dicha tarea. Se suele emplear principalmente para la fase de «En ruta» o para aproximaciones de no precisión y cuenta con dos sistemas en el receptor de abordó:

- **Receptor Autónomo de Monitorización de Integridad (RAIM).** Proporciona vigilancia autónoma de la integridad utilizando mediciones redundantes de los satélites. Su fin es detectar señales defectuosas y alertar al piloto.
- **Detección de Fallos y Exclusión (FDE).** Sistema que utiliza las mediciones del RAIM para excluir a un satélite en el caso de que este se encuentre defectuoso, y permitir así que se continúe navegando excluyéndolo de los cálculos de posicionamiento, siempre y cuando quede un mínimo de satélites disponibles para realizarlos.

3.2. GBAS

Sistema de aumento diferencial de área local, diseñado para proporcionar cobertura entorno al área de un aeropuerto, aproximadamente en un radio de 30 km. El aumento de señal se produce en tierra, razón por la cual el objetivo de los sistemas GBAS es mejorar la precisión e integridad en las fases de aproximación, aterrizaje y despegue.

Su funcionamiento radica en la recepción de señal GNSS para obtener las pseudo-distancias de los satélites operativos y aplicar las correcciones necesarias, las cuales son transmitadas desde las estaciones terrestres a los receptores de las aeronaves cercanas al aeropuerto a muy alta frecuencia (VHF).

Las prestaciones ofrecidas son de gran calidad, hasta el punto de que pueden igualar las ofrecidas por el sistema ILS. Hay varios sistemas GBAS en el planeta, como por ejemplo el americano LAAS (Sistema de Aumentación de Área Local), que es el de mayor relevancia. Sin embargo este sistema aún es relativamente nuevo y por ello el más usado en navegación mundial es el SBAS, del que se hablará a continuación.

3.3. SBAS

El Sistema de Aumentación Basada en Satélite (SBAS) se define como un sistema de gran seguridad enfocado al ámbito civil que proporciona aumentación a nivel regional o en área extensa, incluso a nivel continental [15]. En este caso los satélites geoestacionario (GEO) son los que transmiten la información aumentada a los receptores de las aeronaves. Sus prestaciones, a pesar de no ser tan buenas como las del GBAS, son más que suficientes para poder usarlo en prácticamente todas las fases de vuelo, lo cual es posible ya que su alcance es mucho mayor que el del sistema de aumentación basada en tierra.

En esta sección se analizarán y explicarán los diferentes segmentos que componen la infraestructura de un SBAS, así como el funcionamiento del conjunto de señales que recibe y transmite.

3.3.1. Arquitectura

De manera análoga a las constelaciones GNSS, los sistemas de aumentación basada en satélite cuentan con segmentos espacio, terrestre y usuario. A parte de estos 3, existe un cuarto segmento, el denominado «Segmento de apoyo de misión». En la Figura 2 se puede observar la arquitectura global de un SBAS de manera esquematizada; a raíz de ella se explicarán en detalle cada uno de los 4 segmentos.

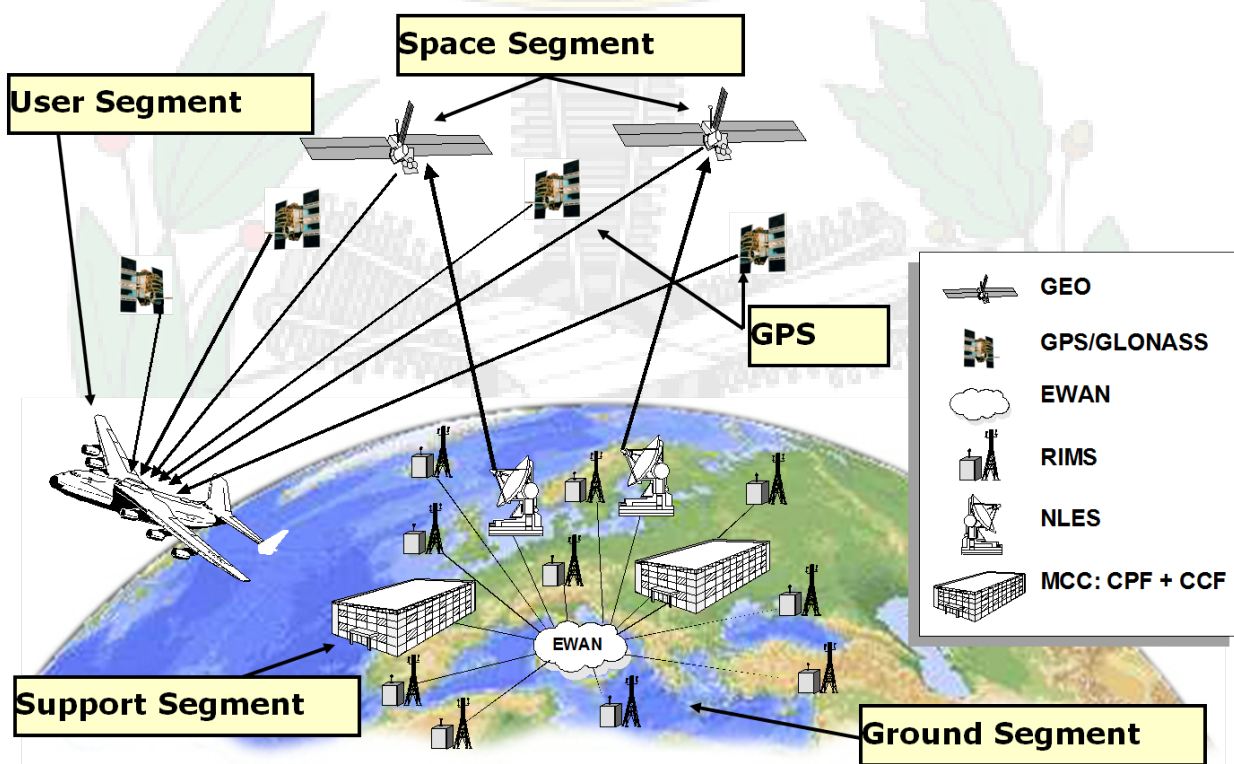


Figura 2: Arquitectura de un sistema SBAS. [15]

- **Segmento espacio.** Está constituido por un conjunto de satélites geoestacionarios, cuya función consiste en difundir el mensaje de navegación SBAS a los diferentes receptores dentro del área de servicio. La carga de pago de los satélites GEO consiste en un transpondedor que recibe la señal generada en el segmento terrestre en banda C de frecuencia, y la trasmite a una banda de frecuencia L para trasmitirla a los receptores. Además, la mayoría de satélites modernos cuentan con un segundo canal de banda C que se utiliza para mejorar el retardo de la señal provocado por la propagación atmosférica.

Por otro lado, cabe destacar que se están implementando en estos últimos años nuevas generaciones de satélites GEO que permitirán mejorar ciertas funcionalidades, como por ejemplo el aumento de ancho de banda y de la potencia de transmisión, o el cambio a transpondedores de doble frecuencia L1/L5.

- **Segmento de misión terrestre.** Se encarga de generar la señal aumentada al aplicar las correcciones y de enviársela al satélite GEO para que éste la trasmita. Para cumplir con este propósito, el segmento terrestre se divide en los siguientes subsistemas:

- *Red de Estaciones Monitoras:* Recibe y almacena los datos a procesar para la aumentación mediante receptores de señal GNSS. Estas son las estaciones denominadas como RIMS, de las cuáles existen 3 tipos.

Las RIMS de tipo A son las que miden los datos procedentes de los satélites directamente, los cuáles se emplearán para calcular las correcciones. De manera análoga, las RIMS de tipo B ofrecen medidas directas del satélite pero con el objetivo de comprobar el estado de difusión y por tanto proporcionar integridad. Finalmente, las RIMS de tipo C son las encargadas de identificar algún tipo de fallo o anomalía en los satélites que pueda haber afectado a la señal recibida.

- *Centro de Instalaciones de Procesado:* Se encargan de procesar los datos recibidos para generar el mensaje a trasmir por los satélites geoestacionarios.
 - *Centro de Control de Satélites GEO:* Genera la señal con el mensaje aumentado y la envía a los satélites GEO.
 - *Capa de comunicación:* Interconecta los diferentes subsistemas del segmento terrestre.
- **Segmento de apoyo a la misión.** Engloba todos aquellos elementos que no están relacionados con la transmisión de datos SBAS pero que son necesarios como instalaciones de apoyo externas para que el sistema funcione correctamente. Dichos elementos son de gran ayuda para las fases de diseño y validación, la certificación de sistemas y aplicaciones y las labores de mantenimiento entre otros aspectos. Algunos elementos de este segmento son:
 - *Simuladores «End to End»:* encargados de simular datos en entornos controlados para comprobar comportamientos del sistema tales como problemas,

comunicación, retardos, etc.

- *Herramientas de análisis de rendimiento*: realizan medidas de las prestaciones a nivel sistemático y también a los usuarios.
 - *Herramientas de monitoreo en línea*: proporcionan un seguimiento del sistema capaz de detectar fallos o anomalías.
- **Segmento Usuario**. Engloba todo el equipamiento de los usuarios que hace uso de la señal SIS de SBAS. Por ello, este segmento no está bajo el control del proveedor de servicios del sistema, si no que lo gestiona el denominado mercado de aplicaciones de SBAS. El proveedor de servicios de SBAS es el que proporciona a los usuarios una variedad de servicios, como por ejemplo el Servicio Abierto, Safety of Life o el Servicio Comercial, ya explicados en el capítulo 2.

3.3.2. Señal SBAS

Los sistemas SBAS proporcionan una señal de gran alcance similar a la empleada por los satélites GPS (L1). De este modo, se consigue aumentar el número de satélites disponibles a los usuarios. Además de la señal de transmisión, el sistema SBAS proporciona correcciones diferenciales que permiten mejorar la información de las constelaciones GNSS, denominadas «Wide Area Differential» (WAD). Junto a estas señales, SBAS provee también información de integridad acerca de la disponibilidad de los satélites GPS, Glonass y Geoestacionarios a través del denominado Canal de Integridad Terrestre/GNSS (GIC).

3.3.3. Fundamentos matemáticos

El modelo matemático en el que se basan los sistemas SBAS proviene del cálculo de posicionamiento diferencial con GPS [16]. Esta técnica se fundamenta en el uso de dos receptores:

En primer lugar, uno de los receptores, ubicado en el punto de referencia A, permanece fijo, mientras que el segundo receptor, ubicado en un punto remoto B, se encuentra en movimiento. En el punto A se encuentra la estación en la que se calculan las correcciones a las pseudodistancias recibidas, conocidas con el término PRC (Pseudo-range Corrections); así como las correcciones de la variación de distancia RRC (Range Rate Corrections). Estas correcciones son enviadas al receptor remoto en tiempo real, el cual aplica las correcciones a las pseudodistancias medidas y así calcula su posición.

Existen dos métodos dentro de la dinámica del posicionamiento diferencial. El SBAS fundamenta sus cálculos en uno de ellos: el modelo matemático de posicionamiento diferencial mediante pseudodistancias de código. De este modo, la pseudodistancia o pseudorange puede calcularse entre una estación A y un satélite j, para una época t_o mediante la expresión (3.1)

$$R_A^j(t_o) = \rho_A^j(t_o) + \Delta\rho_A^j(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_A(t_o) \quad (3.1)$$

donde R es el pseudorange, mientras que ρ alude a la distancia entre satélite y estación. El término $\Delta\rho_A^j(t_o)$ representa el error que engloba el efecto radial de la órbita así como la refracción ionosférica y troposférica, y finalmente los dos términos finales hacen referencia al error de reloj del satélite δ^j y al de la estación δ_A .

Seguidamente, se puede definir la corrección de pseudodistancia para el satélite j en la época t_o mediante la ecuación 3.2.

$$PRC^j(t_o) = -R_A^j(t_o) + \rho_A^j(t_o) = -\Delta\rho_A^j(t_o) + c\delta^j(t_o) - c\delta_A(t_o) \quad (3.2)$$

Paralelamente, se puede calcular mediante iteraciones en una serie temporal de correcciones de pseudodistancia la denominada corrección de variaciones de distancia $RRC^j(t_o)$. Consiguientemente, se podrá obtener la corrección de pseudodistancias de código para un una época cualquiera t mediante 3.3.

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_o) + RRC^j(t_o)(t - t_o) \quad (3.3)$$

Del mismo modo, se puede aplicar este principio matemático a la estación remota B (receptor de la aeronave) mediante 3.4:

$$R_B^j(t_o) = \rho_B^j(t_o) + \Delta\rho_B^j(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_B(t_o) \quad (3.4)$$

Seguidamente se le aplica a la pseudodistancia R las correcciones calculadas por la estación A (3.5):

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t)) \quad (3.5)$$

Al operar matemáticamente se puede observar que el error de satélite se cancela en la ecuación y por tanto no será relevante. Además, para baselíneas de longitud moderada, se puede despreciar también la diferencia de los errores radiales de la órbita la ecuación 3.5 se podría simplificar en la expresión 3.6:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (3.6)$$

en la que el término $c\Delta\delta_{AB}(t)$ hace referencia al error combinado de los relojes de los receptores A y B. De este modo se obtienen las pseudodistancias a los satélites con las correcciones pertinentes para su uso por el receptor de SBAS.

3.3.4. Sistemas SBAS Actuales

Una vez explicado el funcionamiento general de los Sistemas de Aumentación Basada en Satélite, se pasará a estudiar qué sistemas SBAS existen actualmente en el mundo. Brevemente se realizará un análisis de cada uno de ellos para conocer sus características principales.

Antes de comenzar con dicho análisis, es necesario mencionar que se excluirá al Sistema europeo EGNOS de la lista de análisis, debido a que es el sistema de aumentación

que se empleará para el proceso de validación de este proyecto. Por esta razón se hablará de EGNOS detalladamente en el capítulo 4. Habiendo clarificado este punto, los sistemas SBAS más relevantes a nivel mundial son los siguientes:

- **WAAS (Wide Area Augmentation System) [17].** Es el SBAS desarrollado por Estados Unidos, enfocado a aplicaciones civiles de la aviación, el cual comenzó en 1992 bajo mando de la FAA (Federal Aviation Agency) y se encuentra operativo desde 2003. El objetivo del sistema es poder proporcionar las prestaciones establecidas por la OACI de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad al servicio SPS de GPS, de manera que se acabe consiguiendo que se pueda emplear como sistema de navegación para cualquier fase de vuelo dentro de su área de cobertura. Por el momento, WAAS está validado para navegar con los siguientes procedimientos:
 - LNAV (Lateral Navigation).
 - LNAV/VNAV (Lateral Navigation/Vertical Navigation).
 - LP (Localizer Performance).
 - LPV (Localizer Performance with Vertical guidance).
- **MSAS (MTSAT Satellite Augmentation System [18].** Sistema SBAS desarrollado por Japón y operado por su Ministerio de Infraestructura y Transporte y por la Agencia Meteorológica Japonesa. Es de carácter civil y su objetivo radica en mejorar la precisión, integridad y disponibilidad de los denominados satélites de transporte multifuncionales (MTSAT). Está operativo desde 2007 y actualmente se puede emplear en fase de Ruta y aproximaciones de no precisión, pero en un futuro quiere alcanzar prestaciones para poder navegar mediante LPV-200.
- **GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) [19].** Sistema SBAS desarrollado por el gobierno Indio desde 2001 y operativo a partir de 2013. Proporciona servicios de aumentación mediante transmisión de frecuencias L1 y L5 a con modulación GPS. Actualmente se encuentra disponible para navegar mediante RNP 0, RNP 1 y APV-2 en fase de ruta.

4. EGNOS

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) es el sistema de aumentación basada en satélites europeo, el cual surge de un acuerdo entre tres organismos: la Agencia Espacial Europea (ESA), que es la que ha desarrollado el proyecto, La comisión Europea (EC) y la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol). A partir del año 2009, los activos de EGNOS se trasladaron a la EC, que se encarga de gestionar y financiar los servicios del sistema a través de la Agencia Europea de GNSS (GSA). [20]

El sistema permite complementar la señal GPS y mejorar sus prestaciones. Transmite en la frecuencia L1 del propio GPS, en la cual envía mensajes de integridad a tiempo real, permitiendo por tanto garantizar el buen funcionamiento de la misma. Además, permite un aumento notable de la precisión del GPS, como por ejemplo de 10 a 2 metros a nivel horizontal. En las presentes secciones se estudiará la arquitectura, señal y demás características del sistema EGNOS.

4.1. Arquitectura

Como cualquier sistema SBAS, EGNOS se divide en 4 segmentos principales, caracterizados por lo siguiente:

En primer lugar, el segmento espacial se compone actualmente de tres satélites geostacionarios, los cuales presentan un PRN (Pseudo Random Noise), parámetro de frecuencia único para cada satélite que permite identificarlos. Dos de ellos se encuentran en la plataforma operacional de EGNOS, transmitiendo la denominada «Signal In Space (SIS)» que los usuarios del sistema utilizarán para la navegación. Estos satélites son:

- PRN-123.
- PRN-136.

Por otro lado, el tercer satélite del sistema se encuentra en la plataforma de pruebas, retransmitiendo el TEST SIS. El identificador de este satélite es el PRN-120.

El segmento terrestre, por su parte, está compuesto por diferentes tipos de instalaciones distribuidas en Europa y conectadas entre sí mediante una red de comunicaciones terrestre. Estas instalaciones son:

- 40 estaciones RIMS, encargadas de recibir la señal de los satélites GNSS y mandar esa información a los Master control Centers (MCC).
- 2 MCC, que cuentan con centros de control y procesado (CPF) que reciben la información de las RIMS y generan los mensajes de corrección para mejorar la precisión y también mensajes informativos del estado del sistema para garantizar la integridad del mismo.

- 6 Estaciones de navegación terrestres (NLES), las cuales reciben los mensajes con las correcciones y se encargan de enviar esta información a los satélites geoestacionarios, para que estos la distribuyan después a los usuarios.

Además EGNOS presenta un segmento de apoyo con instalaciones en las que se realizan labores de gestión de operaciones y evaluaciones del rendimiento del sistema.

Finalmente, el segmento usuario engloba al conjunto de equipos receptores de señal de EGNOS que hay en los diferentes usuarios del sistema, tales como aeronaves o barcos.

4.2. Señal EGNOS

4.2.1. Correcciones

El funcionamiento de EGNOS radica en la aplicación de correcciones a la señal GNSS, en esta sección se explicarán los diferentes tipos de correcciones que se desarrollan en los MCC para aumentar la señal GPS. Existen tres tipos [21]:

- **Correcciones rápidas.** Encargadas de lidiar con los problemas de sincronización entre los relojes de satélites y receptores de señal.
- **Correcciones a largo plazo.** Son las que proporcionan la información correspondiente a la posición de los satélites. Tanto en las correcciones lentas como en las rápidas viene incluida la precisión conseguida al realizar los cálculos correspondientes.
- **Correcciones ionosféricas.** El sistema EGNOS presenta tecnología para simular las condiciones de la ionosfera terrestre en tiempo real y de este modo permite generar un modelo de correcciones aplicado a cada instante.

4.2.2. Estructura de Mensaje

La señal del sistema EGNOS, que utiliza la misma banda de frecuencia que GPS, transmite la información GNSS aumentada gracias a las correcciones. Sin embargo, el formato de datos de los mensajes es totalmente distinto.

La estructura de dicha señal viene definida en el documento 229D de diciembre de 2006, elaborado por la Comisión Radio-Técnica para la Aeronáutica (RTCA) [22]. En primer lugar, el tamaño de los mismos es de 250 bit, los cuales se reparten en 4 partes, tal y como se muestra en la Figura 3.

1. *Preámbulo.* Campo de 8 bits que permite que las señales GPS y SBAS coincidan, consiguiendo así que haya sincronía en la transmisión.
2. *Identificador del tipo de mensaje.* Es un campo de 6 bits que permitirá saber el tipo de mensaje que se está transmitiendo de acuerdo a la clasificación adjuntada a continuación en la Figura 4.

3. *Campo de datos.* Parte del mensaje que almacena la información relevante ya sea de correcciones o mensajes de integridad, en función del tipo de mensaje.
4. *Bits de Paridad.* 24 bits cuya función radica en la protección de la información ante posibles pérdidas o errores en los datos.

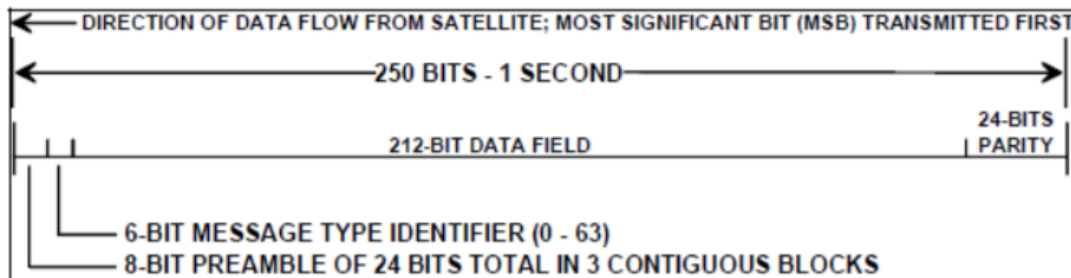


Figura 3: Estructura de los mensajes SBAS-Formato de Datos [22].

Actualmente se establecen 22 tipos de mensaje en función del contenido de los mismos, mostrados en la Figura 4 para su posterior análisis.

Type	Contents
0	Don't use for safety applications (for SBAS testing)
1	PRN Mask assignments, set up to 51 of 210 bits
2 to 5	Fast corrections
6	Integrity information
7	Fast correction degradation factor
8	Reserved for future messages
9	GEO navigation message (X, Y, Z, time, etc.)
10	Degradation Parameters
11	Reserved for future messages
12	SBAS Network Time/UTC offset parameters
13 to 16	Reserved for future messages
17	GEO satellite almanacs
18	Ionospheric grid point masks
19 to 23	Reserved for future messages
24	Mixed fast corrections/long term satellite error corrections
25	Long term satellite error corrections
26	Ionospheric delay corrections
27	SBAS Service Message
28	Clock-Ephemeris Covariance Matrix Message
29 to 61	Reserved for future messages
62	Internal Test Message
63	Null Message

Figura 4: Tipología de mensajes de EGNOS. [22]

De los 22 tipos mostrados en la lista anterior, hay que descartar los valores 8, 11, 13 a 16, 19 a 23 y 29 a 61, ya que aún no tienen asignados ningún tipo de mensaje y simplemente se reservan para futuras aplicaciones. Eliminando esos 5 grupos se tiene un total de 17 tipos de mensajes, de los cuáles se hará hincapié en aquellos que sean más útiles o necesarios para el desarrollo de este proyecto:

- **Tipo 0.** Se usa principalmente cuando el sistema está en fase de pruebas (SBAS testing). Es un mensaje que establece que el sistema ha tenido un fallo de integridad y que por tanto no puede garantizar que los datos enviados sean correctos. Normalmente, en el campo de la navegación aérea, cuando se envía un mensaje de tipo 0 el resto de mensajes de la señal suelen llegar vacíos para evitar que se use la información comprometida.
- **Tipo 1.** Corresponde a un cambio o transición de máscara PRN. Generalmente no se utiliza ya que a cada satélite se le asigna un valor PRN en primera instancia que se pretende mantener a lo largo del tiempo.
- **Tipo 2 a 5.** Incluyen los mensajes con las correcciones rápidas, aludiendo a distintos satélites en función del tipo. Por ejemplo, los de tipo 2 contienen los datos para los primeros 13 satélites designados en la máscara PRN. El tipo 3 alude a los satélites del 14 al 26 y así sucesivamente hasta llegar al satélite 51, que es el límite de satélites, establecido de acuerdo a la restricción mencionada en el Tipo 6.
- **Tipo 6.** Los mensajes de este tipo proporcionan información de integridad a un máximo de 51 satélites debido a que la franja de datos disponible es de 204 bits, y al hacer la división de 4 bits por mensaje se obtienen 51 intervalos posibles.
- **Tipo 9.** Son los que incluyen la información de navegación en coordenadas cartesianas y los que permiten obtener las pseudodistancias con las que aplicar los cálculos explicados en la sección 3.3.3.
- **Tipo 17.** Incluye los almanaques de los satélites GEO, los cuales se transmitirán de forma periódica para alertar al usuario de su existencia, localización, y del estado y salud del servicio proporcionado.
- **Tipo 25.** Engloba las correcciones a largo plazo, estimadas con respecto a los parámetros GNSS de efemérides y relojes.
- **Tipo 26.** Incluye las correcciones debidas a la presencia de ionosfera basándose en los modelos a tiempo real ya comentados, los cuales varían en función de la ubicación del usuario.
- **Tipo 63.** Se utiliza como mensaje de relleno en el caso de que no haya disponible ningún otro mensaje.

4.3. Servicios

EGNOS ofrece a todos sus usuarios un sistema de posicionamiento y navegación de altas prestaciones. Presenta tres servicios disponibles:

- **Open Service.** El servicio abierto de EGNOS es una prestación de EGNOS totalmente libre y disponible al usuario que permite mejorar las prestaciones de las constelaciones GNSS [24]. Proporciona posicionamiento a tiempo real a cualquier usuario con un receptor compatible de GPS/SBAS, permitiendo su uso en aplicaciones de propósito general, no requiriendo por tanto autorización o regulación por autoridades competentes como la ESA. De este modo, el OS se utiliza en campos de gran variedad, como por ejemplo técnicas de fumigado de pesticidas en el sector de la agricultura, trazado de mapas, transporte por carretera e incluso marítimo a nivel de navegación general.
- **Safety of Life.** Proporciona una mejora de prestaciones regulada superior a la del OS. El propósito del SoL es el de poder usarlo en aplicaciones de transporte en las cuales podría haber peligro en el caso de no cumplir con los requerimientos de las prestaciones. Por lo tanto, es el servicio que proporciona unas características específicas para su uso en el campo de la navegación aérea [25]. De hecho, el servicio es compatible con los requerimientos de navegación para aproximaciones con guiado vertical (APV) y categorías I de ILS, así como para LPV-200, que es el procedimiento que pretende validar este TFG para el aeropuerto de Alicante.
- **Servicio de Acceso de Datos de EGNOS (EDAS).** Finalmente el servicio EDAS tiene como objetivo dar acceso a usuarios que necesiten datos para uso comercial o profesional [26]. Este servicio es el que más interesa al desarrollo del proyecto, pues es un servicio que será utilizado directamente en el proceso de validación, pues permitirá acceder a los ficheros de navegación de los días de estudio. Todos estos conceptos se explicarán más adelante al describir el procedimiento seguido para la validación.

EGNOS constituye un papel relevante en el desarrollo de este proyecto, pues proporciona acceso a toda la información y base de datos que se necesita para realizar los análisis de las prestaciones. Además se ha contactado directamente con su plataforma de apoyo para consultarles dudas, a lo que han respondido con envío de documentación crucial para el mejor entendimiento de todo el proceso que conlleva la validación para este tipo de procedimientos.

5. Navegación PBN

El concepto de la Navegación basada en prestaciones o PBN queda definido en el DOC 9163 de OACI [27] mediante tres componentes:

- **Aplicación de Navegación.** Es el componente principal, ya que constituye el objetivo que se trata de alcanzar mediante los otros dos componentes. Engloba conceptos de servicio de tráfico aéreo (ATS) tales como rutas de vuelo, así como los distintos instrumentos y procedimientos de navegación, como por ejemplo las aproximaciones (STAR) o salidas (SID).
- **Infraestructura de Radioayudas (NAVAID Infrastructure).** Alude a todos aquellos sistemas o elementos que proporcionan ayuda a la navegación, desde equipamiento tradicional como el DME, ILS y el VOR, hasta los sistemas de aumentación.
- **Especificación de Navegación.** Consiste en una especificación técnica y operacional que identifica la funcionalidad requerida en el equipo de abordaje de una aeronave, así como el entrenamiento necesario de la tripulación que opere dicho equipo. Existen dos tipos de especificaciones, RNAV y RNP.

Dentro del concepto de PBN, en este capítulo se profundizará en el ámbito de las especificaciones, estudiando los distintos tipos de ayudas a la navegación existentes. En una primera instancia se estudiarán de manera general y luego se profundizará en un caso concreto, el de la fase de aproximación, que es el que resulta de interés para realizar la validación SBAS del aeropuerto de Alicante.

5.1. Especificaciones de Navegación

Se ha mencionado que la especificación de navegación establece las prestaciones que deben de cumplirse en un área determinada. Existen dos tipos a partir de los cuales surgen los diferentes procedimientos de navegación PBN.

En primer lugar, el término *RNAV (Area Navigation)* se basa en el método de navegación tradicional conocido como «punto a punto», mediante la cual se proporciona asistencia de navegación siempre y cuando el receptor GNSS del usuario se encuentre dentro del área de cobertura. Dado el caso, las aeronaves operan siguiendo rutas, las cuales presentan puntos bidimensionales que se definen en un plano horizontal de manera que se conozca su latitud y longitud. Estos puntos se denominan waypoints, y constituyen una parte importante dentro de los procedimientos que hay en las cartas aeronáuticas, pues resulta de gran facilidad entenderlos y guiarse a través de ellos. Esta navegación proporciona información de posicionamiento mediante sistemas GNSS. Sin embargo, las prestaciones de este tipo de especificación suele ser variable dependiendo de la zona y por tanto de la terminal de control, que dictamina los valores mínimos de precisión con los que se debe navegar para garantizar la separación de aeronaves. Además, en las especificaciones RNAV no se requiere que haya un sistema de monitoreo y alerta, por lo

que no se cumple con la integridad del sistema.

La navegación *RNP* (*Required Navigation Performance*, por su parte, lleva los fundamentos básicos de RNAV al siguiente nivel, puesto que mejora las prestaciones en todos los ámbitos. Es capaz de reducir notablemente el error de precisión, y además garantiza el seguimiento del sistema para comprobar si este tiene algún fallo y entonces mandar una alerta, proporcionando por tanto integridad y continuidad al mismo.

Dentro de estos dos bloques de especificaciones, hay una ramificación de diferentes subtipos, como se muestra en la Figura 5 .

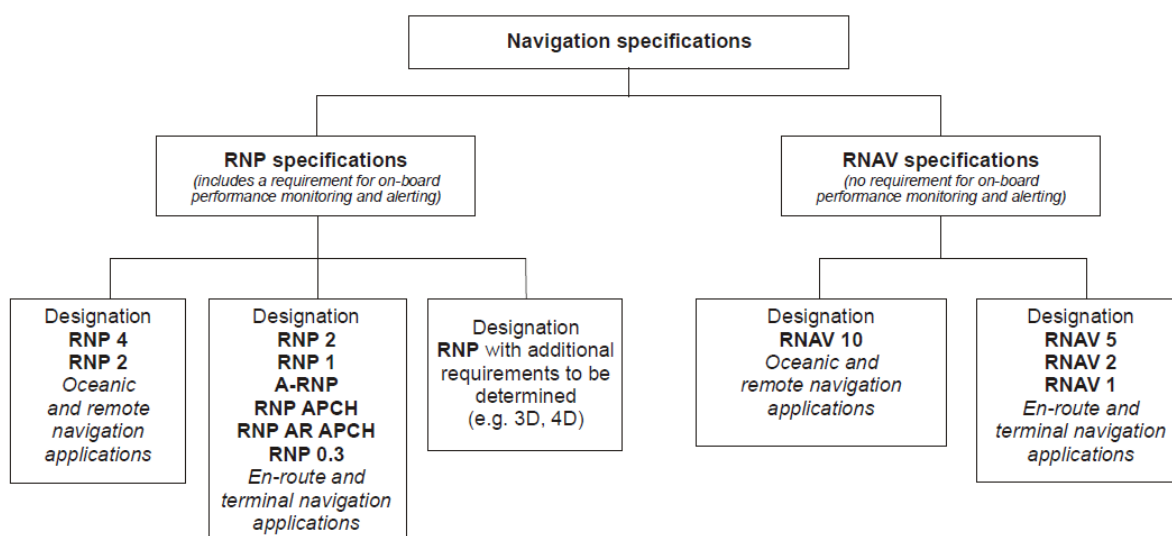


Figura 5: Designaciones de especificación de navegación [27].

Como se puede observar las especificaciones se se dividen principalmente en dos ramas cada una, una para aplicaciones marítimas y remotas de navegación, y otra para aplicaciones de navegación aérea. Dentro del bloque de navegación aérea, se hará hincapie en la rama de RNP que se centra en los procedimientos de aproximación: RNP APCH.

5.2. Especificaciones de navegación en fase aproximación (RNP APCH)

El concepto «RNP Approach» engloba todos los segmentos de instrumentos empleados en el procedimiento de aproximación que permiten reemplazar a los sensores internacionales. Así, se distingue entre sensores GNSS, SBAS, GBAS, etc. En esta sección se contextualizará dentro del concepto global de aproximación, definiendo términos relevantes al procedimiento y procediendo a su clasificación.

5.2.1. Conceptos de Aproximación

En el momento en el que una aeronave inicia la fase de aproximación hacia un aeropuerto hay diferentes parámetros o conceptos que se deben considerar para su posterior clasificación.

Un parámetro determinante es *La altura de decisión*, que es el valor mínimo de altura que se establece en función del procedimiento de aproximación, de manera que si al alcanzar dicho valor, el piloto no tiene contacto visual con la pista, éste deberá efectuar la denominada maniobra de frustrada, interrumpiendo por tanto el aterrizaje. Cuanto mejor sea la precisión y el resto de prestaciones del sistema de navegación empleado, menor será la altura de decisión o DA (Decision Altitude) que establezca OACI en función de las prestaciones y garantías que caracterizan a cada procedimiento.

Por otro lado, es necesario mencionar que los diferentes procedimientos se miden también en función de su integridad mediante los denominados límites de alerta vertical y horizontal, los cuales establecen un valor máximo de radio alrededor de la aeronave en el cual se garantiza que la precisión proporcionada no supere el mismo y que por tanto el sistema funciona correctamente. Estos parámetros se explicarán de forma más ampliada cuando se expliquen los requerimientos de validación en el capítulo 7.

5.2.2. Clasificación de Procedimientos de Aproximación

El procedimiento de aproximación, independientemente de su especificación, se puede clasificar en 3 tipos:

- **Aproximaciones de No Precisión (NPA)**
- **Aproximaciones de Precisión (PA)**
- **Aproximaciones con Guiado Vertical (APV)**

En función de esta clasificación se puede ver en la Figura 6 como se clasifican el conjunto total de aproximaciones, tanto las convencionales como PBN.

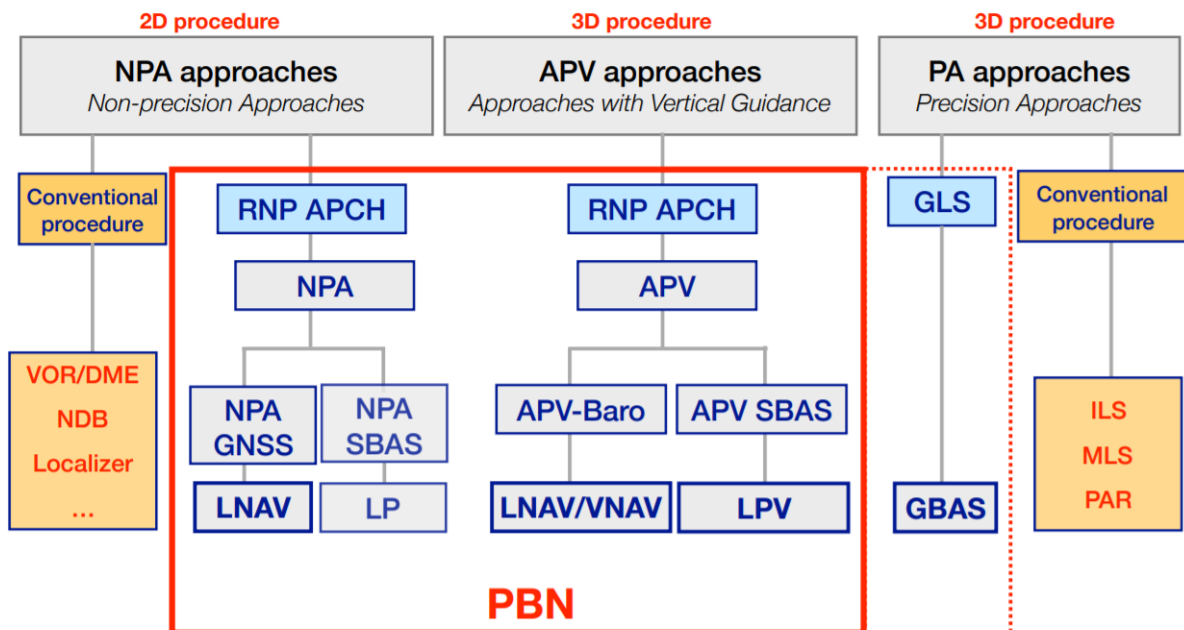


Figura 6: Clasificación de procedimientos de aproximación. [28]

Esta clasificación permite diferenciar un concepto crucial en la navegación. Cuando se habla de aproximación de no precisión se alude al hecho de que solo se proporciona guiado horizontal y no vertical, es decir en dos dimensiones. Todo ello engloba instrumentos convencionales como el VOR/DME o el Localizador, así como una parte de los procedimientos de navegación RNP. Del mismo, la aproximación de precisión PA presenta por su parte procedimientos convencionales como el ILS, y también una pequeña parte de procedimientos PBN.

Con estos hechos se pretende explicar que la navegación PBN se halla en un punto medio entre los procedimientos convencionales de no precisión y los de alta precisión, de manera que en función de los requerimientos se pueden adaptar mejor a la función para la que son requeridos.

Una vez contextualizados, se pasará hablar de los diferentes procedimientos PBN que se observan en la Figura 6:

- LNAV (Navegación Lateral).** Proporciona una navegación mediante guiado lateral haciendo uso de la información de los sistemas GNSS, equivalente a utilizar un localizador. Es un procedimiento de No Precisión ya que no presenta guiado vertical. Por tanto la integridad estará presente a nivel horizontal, con un nivel de alerta al sistema de 0.3 millas náuticas (556 m) y la aeronave en cuestión deberá llevar incorporado un sistema RAIM que detecte si hay un fallo en algún satélite GNSS. Además la aproximación se realizará hasta alcanzar el valor mínimo de altura de decisión o MDA/H (Minimum Decision Altitude/Height).
- LP (Localizer Performance).** Es un sistema de navegación que proporciona características similares al LNAV, con la variante de que el LP utiliza información de un

sistema SBAS en lugar de tomar directamente los datos GNSS. Del mismo modo, proporciona integridad a nivel horizontal y cuenta con un valor mínimo de altura de decisión.

- **LNAV/VNAV (Navegación Lateral/Navegación Vertical).** Procedimiento de aproximación de precisión con guiado vertical a partir del empleo de datos GNSS para la navegación en el plano horizontal, y utilizando un barómetro para el guiado en el plano vertical de manera que permita conocer la altitud en cada instante a través de medidas de presión. Proporciona integridad del mismo modo que en el LNAV, con la agregación de sistemas externos como por ejemplo el altímetro para garantizarla también a nivel vertical. Este tipo de procedimiento se conoce también como APV-BARO y también cuenta con una altitud mínima de decisión establecida por la OACI.
- **LPV.** Es un procedimiento que proporciona navegación vertical y horizontal mediante el uso de sistemas de aumentación por satélite. Cuenta del mismo modo que los otros procedimientos con una altitud mínima de decisión, pero proporciona integridad a través de monitoreo que comprueba que los niveles de alerta verticales y horizontales se cumplen en todo momento, avisando al sistema en el caso de que haya algún fallo. El tan nombrado LPV-200 es un procedimiento de este tipo, el cual se explicará a continuación de manera más detallada.
- **GBAS.** Finalmente, cabe mencionar que dentro de las aproximaciones de precisión se puede incluir al sistema GBAS, ya que como se mencionó en el capítulo 3 es el que mejor prestaciones ofrece. Su poco alcance no se ve afectado para procedimientos de aproximación ya que su rango es más que suficiente para asegurar una gran precisión junto con niveles óptimos de integridad, continuidad y disponibilidad.

5.3. LPV-200

El término LPV-200 hace referencia a un procedimiento LPV relativamente nuevo que permite reducir la altura de decisión a 200 pies, convirtiéndose por tanto en un sistema equivalente al ILS de Categoría I, de acuerdo a lo establecido en el Anexo 10 de la OACI [29].

Estados Unidos se encuentra al frente de esta carrera, pues actualmente cuenta con una cobertura global de todo el continente de América del Norte en el cual prácticamente todos los aeropuertos de aviación general han sido validados para procedimientos LPV. Europa, por su parte, comenzó a implementar estos procedimientos a partir de 2015 con el objetivo de alcanzar una cobertura de área global a todos los aeropuertos que engloba el alcance de EGNOS. El desarrollo de este programa ha supuesto un gran abanico de mejoras y beneficios con respecto a los sistemas convencionales en diferentes campos, además de la reducción del mínimo de altitud de decisión.

- Proporciona las mismas prestaciones que el ILS sin la necesidad de que exista un equipo de aproximación terrestre auxiliar en el caso de que se produzca algún fallo.

- Aumenta la seguridad ya que el guiado vertical se le proporciona directamente a la tripulación, facilitando por tanto la maniobrabilidad en el proceso de aproximación.
- Permite reducir la dispersión en la trayectoria y contribuir por tanto a disminuir la contaminación acústica y optimizar el combustible.
- Su tecnología ofrece la oportunidad de eliminar las aproximaciones en círculo.
- El coste de instalación y mantenimiento es bastante inferior al del sistema ILS y demás radiobalizas, por lo que no solo será una mejor opción para implementar en pistas en las que no haya ILS, sino que en un futuro se podrán reemplazar directamente por ellos cuando se queden obsoletos.
- Requiere de un entrenamiento sencillo para la tripulación de vuelo.
- El sistema presenta mayor estabilidad de señal que el ILS, garantizando por tanto un mejor rendimiento frente a interferencias de la misma.
- El empleo de tecnología SBAS permite que, si las condiciones se reúnen, no sea necesario cambiar de sistema de navegación en función de la fase de vuelo, por tanto facilitando la labor de los pilotos y reduciendo las posibilidades de error humano.

Estos puntos justifican el hecho de que a medida que avanza el tiempo va incrementando el número de aeropuertos que se ha validado para operar mediante procedimientos basados en sistemas de aumentación, pues representan claramente el futuro de la navegación aérea, con lo cual se justifica la gran utilidad que supone el desarrollo del presente proyecto.

En España el número de aeropuertos que han sido validados para procedimiento SBAS o GBAS es bastante bajo. Sin embargo prácticamente todos los aeropuertos del país están planeados para que su validación se desarrolle en los próximos años, y entre ellos el de Alicante. A nivel nacional, la organización que se encarga de realizar estas validaciones es ENAIRE, de la cual se hablará en el próximo capítulo, pues resultará ser una pieza clave en la realización de este TFG.

6. ENAIRE

De acuerdo a lo establecido en su página oficial [30], ENAIRE «es el principal proveedor de servicios de navegación aérea y de información aeronáutica en España, el cuarto en Europa por volumen de tráfico y uno de los más importantes a nivel mundial».

Es una entidad pública de carácter empresarial, supeditada al Ministerio de Fomento de España, que cuenta con la participación accionarial de empresas como **Ineco**, **Cri-da** o **GroupEAD**. ENAIRE dispone de una infraestructura para proporcionar todo tipo de servicios de apoyo a la navegación aérea, englobando elementos como torres de control, radioayudas orientadas a diferentes fases de vuelo, centros de comunicaciones y centros de control de toda la red de instalaciones.

ENAIRE proporciona servicios en todas las fases de vuelo, y engloba en ellas a todos los aeropuertos de la red Aena, gestora de aeropuertos de interés general en España. De entre todos sus servicios, resulta de especial interés el de validación de procedimientos para poder operar en las distintas fases de vuelo.

En el momento de realizar el TFG, se ha contactado con ENAIRE personalmente, concretamente con el Departamento de Navegación por Satélite, con sede en Madrid. La responsable de dicho departamento, Ana Boderó, comunicó que actualmente el procedimiento de validación del Aeropuerto de Alicante se había reformulado en un proyecto mayor, que consistía en la validación para LPV-200 de todo el área correspondiente a la TMA de Valencia. Dicho proyecto corre a cargo del equipo de Ana, quien se ha ofrecido a revisar los datos medidos y procesados. De este modo, cuando se realice el procedimiento de validación para este proyecto se contrastarán las prestaciones directamente con el equipo de ENAIRE, obteniendo así una mejor perspectiva y garantizando una mayor fiabilidad de los mismos.

Además, cabe mencionar que se concretó que la validación tendría en cuenta los requerimientos impuestos por el SoL para LPV-200, que constituyen un conjunto más restrictivo y por tanto garantizan una mayor eficacia que los requerimientos que establece la OACI. Ambos requerimientos se explicarán en el capítulo 7.

7. Diseño y Validación de procedimientos

El procedimiento a realizar para validar un aeropuerto permitiendo que el mismo pueda operar mediante LPV-200 parte de una serie de pautas o requerimientos establecidos por la OACI. En este capítulo se explicará con detenimiento el esquema a seguir en un proceso de validación así como los requisitos que se deben cumplir para certificar que un aeropuerto puede operar mediante SBAS.

7.1. Emplazamiento

Como ya se ha mencionado durante el desarrollo teórico del proyecto, el aeropuerto a validar es el de Alicante, España, con clave OACI «LEAL». Debido a que este proyecto no pertenece a ninguna empresa competente que tenga la potestad de ejecutarlo, que en este caso sería ENAIRE, no se puede acceder a una base de datos recibidos en el propio aeropuerto, por lo que se emplearán los datos de la ERGNSS (Estación de Referencia GNSS) de Alicante, denominada con el término «ALAC» y situada en el puerto marítimo de dicha ciudad.

Las estaciones ERGNSS constituyen una gran red a nivel nacional capaz de proporcionar cobertura a todo el territorio. Su función es actuar como receptores GNSS para obtener información para la navegación y otras tareas de carácter cartográfico, geodésico, etc. Esta infraestructura ha sido desarrollada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), agencia respaldada por el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. La red permite establecer las referencias necesarias para el sistema ETRS89, y presenta las siguientes características y objetivos. [31]

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos Sistemas de Referencia Globales en el territorio nacional.
- Ser puntos fundamentales de la Red Europea EUREF de estaciones permanentes para la densificación de los marcos globales y definición del sistema ETRS89. Así mismo, dos de las estaciones forman parte de la red internacional de información geográfica, conocida como IGS.
- Utilización de los registros de datos continuos para estudios de geodinámica, troposfera, ionosfera y meteorología entre otros.
- Definir una red fundamental como apoyo para aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales.
- Proporcionar a los usuarios de GNSS, públicamente, los datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.

Mediante el uso de la estación ERGNSS se obtendrán parte de los datos para realizar el proceso de validación, siendo de vital importancia algunos parámetros de la misma, como por ejemplo su ubicación. Esta y otras características vienen indicadas en la reseña de Estación Permanente de Alicante, mostrado en el Anexo de Documentación complementario a esta memoria.

7.2. Requerimientos OACI

Las prestaciones que determinan la operabilidad de un sistema se reúnen en cuatro parámetros, conocidos como disponibilidad, continuidad, precisión e integridad. Para poder determinar la calidad de un sistema GNSS o de un sistema de aumentación OACI establece una serie de requerimientos que se deben cumplir en función de la fase de vuelo y también de los distintos procedimientos seguidos en ellas. Ante esta situación el servicio Safety of Life de EGNOS recoge los términos a seguir en cada caso en su documento de definición de Servicio [25].

En la Figura 7 se muestra los requisitos RNP establecidos por OACI que el servicio SoL debe cumplir para diferentes escenarios, tanto de fases de vuelo como en diferentes procedimientos de aproximación.

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 $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	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 $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	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 $1 - 1 \times 10^{-6}/h$	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)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	40 m (130 ft)	35.0 m to 10.0 m (115 ft to 33ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Figura 7: Requerimientos de las prestaciones del SoL (OACI) [25].

Estos valores, sin embargo son de carácter general ya que la OACI trata de normalizar internacionalmente unas mismas pautas. EGNOS, pretende hacer uso de estos requerimientos y mejorar las prestaciones a un nivel superior. Así, mediante su servicio SoL trata de ofrecer los valores mostrados en la Figura 8, donde ya se muestra específicamente las prestaciones que debe tener un sistema que funcione mediante el procedimiento LPV-200.

		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^{-3} per hour in most of ECAC <1 – 2.5×10^{-3} per hour in other areas of ECAC	0.999 in all ECAC
	APV-I & LPV200 ¹⁵	3 m ¹⁶	4 m ¹⁶	$1 - 2 \times 10^{-7} / \text{approach}$		<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

Figura 8: Rendimiento mínimo ofrecido por el SoL de EGNOS [25].

En el presente capítulo se hablará de cada una de las prestaciones con detenimiento, prestando atención a los parámetros que las caracterizan así como a los valores que se deben cumplir para garantizar la operabilidad del sistema durante el procedimiento de aproximación.

7.2.1. Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema de navegación se define como el porcentaje de tiempo durante el cuál los servicios de dicho sistema se hallan en un estado utilizable por los usuarios [32]. El término disponibilidad engloba dos conceptos.

Por un lado, la disponibilidad como tal hace referencia a un indicador que expresa la capacidad del sistema para proporcionar el servicio para el cual está pensado dentro de un área de cobertura específica. Por el otro, se habla de disponibilidad de señal, que es el porcentaje de tiempo que las señales de navegación (SIS) están operativas y listas para su uso. Por tanto, el concepto disponibilidad alude a una función de características físicas del entorno en la que se encuentre el sistema así como de especificaciones y capacidades técnicas de los transmisores y demás componentes del mismo.

El método empleado para medir la disponibilidad es porcentual. De este modo se expresa en tanto por ciento el tiempo que el sistema ha estado utilizable para los usuarios en función del tiempo total para el que se ha evaluado dicha magnitud. El sistema EGNOS engloba la disponibilidad de sus satélites operativos y de este modo ofrece un mapeado completo que muestra cuando el sistema se haya disponible o no, permitiéndole por lo tanto que en el caso de que un satélite falle, se pueda seguir garantizando la

disponibilidad del sistema ya que todavía hay otros disponibles.

El concepto de disponibilidad por sí solo no es muy complejo, pero hay que considerar que el hecho de que el sistema de navegación se encuentre disponible no garantiza que la información que esté transmitiendo sea fiable. De este modo, es necesario verificar la integridad del sistema, mostrando así que los propios requerimientos no son parámetros independientes, sino que constituyen un conjunto de información que se debe verificar en su totalidad, ya que cuando uno de los 4 no se cumple puede implicar de manera directa que tampoco se cumplan otros.

En el caso de LPV-200, se puede observar en la Figura 8 como el valor mínimo de disponibilidad que debe garantizar un sistema para operar siguiendo esta clase de procedimientos debe ser de un 99 % del tiempo medido.

7.2.2. Continuidad

La continuidad de un sistema es la habilidad del mismo para realizar su función sin interrupciones durante una operación determinada [33]. Es un parámetro que se mide mediante términos estadísticos, el cual pretende mostrar la probabilidad de que el desempeño del sistema en cuestión se mantenga durante el transcurso de la operación a realizar suponiendo que al inicio de la misma el sistema se encuentre disponible. Existen diferentes tipos de fallos de continuidad a considerar:

- **Fallos graves.** Aluden a aquellas situaciones en las que cesa la transmisión de señales GNSS. Estos fallos pueden ser graduales, como por ejemplo puede suceder cuando un satélite deja de recibir actualizaciones de mensajes y su funcionamiento se va degradando hasta producirse la interrupción, o ocurrir de manera repentina, como en el caso de que se produjese una caída en la potencia del sistema, interrumpiendo así la transmisión de datos.

Además de distinguir la forma en la que se producen, los fallos graves pueden clasificarse según su impacto. Por un lado estarían los fallos a largo plazo, que supondrían una pérdida irrecuperable de los datos de la señal, dando lugar así a que se deba lanzar un nuevo satélite para solventar el problema. Por otra parte, están los fallos a corto plazo, que suponen una pérdida temporal de los datos, la cual puede ser mitigada con un cambio de interruptor que permita hacer uso de información de otros satélites, aludiendo así a la capacidad de redundancia de la constelación GNSS en uso.

- **Fallos por desgaste.** Son aquellos que se pueden producir cuando el sistema está llegando a su fase de End-of-Life (EoL), característica que expresa cuando un satélite va a dejar de estar operativo en función de su diseño. Estos fallos presentan una ventaja frente a los graves, ya que se pueden predecir o por lo menos estimar

en que franja de tiempo tendrán lugar.

- **Fallos leves.** No representan fallos en la continuidad de la señal, sino que aluden a aquellas situaciones en las que el sistema, a pesar de estar disponible, está transmitiendo información errónea y por tanto lo que sucede es que se está produciendo un fallo en la integridad.
- **Fallos debidos a operaciones de mantenimiento de satélites (O&M).** Este tipo de fallos es distinto al resto, dado que las interrupciones que se producirán en el sistema están planificadas y por tanto se podrán tomar medidas previamente a que ocurran, mitigando de este modo los problemas que puedan acarrear.

Teniendo en cuenta los diferentes fallos que pueden producirse en la continuidad del sistema, esta característica se mide con un parámetro probabilístico denominado riesgo de continuidad, que mide la probabilidad de que un evento de discontinuidad ocurra en un período de tiempo determinado. Para la aproximación mediante LPV-200, el riesgo de continuidad máximo que puede presentar el sistema es de $1 \cdot 10^{-4}$ o $5 \cdot 10^{-4}$ en función del tipo de región de acuerdo con la Conferencia Europea de Aviación Civil. Sin embargo, OACI establece que si en algunos casos no se alcanzan las prestaciones de seguridad requeridas se podrá navegar siguiendo el procedimiento de navegación en cuestión siempre y cuando las autoridades de navegación locales definan una serie de medidas que permitan mitigar estos riesgos.

7.2.3. Precisión

La precisión de una medida o estimación de posición de un vehículo en un tiempo dado se define como el grado de conformidad de dicha estimación con respecto a la posición real [34]. La medida de este parámetro es de carácter estadístico, puesto que los errores de posición se expresan mediante la probabilidad de que su valor no excederá una cantidad determinada.

Hay varias formas matemáticas de expresar las mediciones de precisión, pero la más empleada es la del percentil ($x\%$), que hace referencia a que el $x\%$ de las posiciones calculadas en un período determinado de tiempo tienen un error igual o menor al valor establecido de precisión. Valores típicos de este percentil son 50%, 67%, 75% y 95%, siendo este último el más empleado dentro del sector de la navegación aérea.

Por otro lado, se tiene el valor numérico del error de posición. Al tratarse de una aproximación de precisión, el guiado de la aeronave debe ser tridimensional, es decir, tanto vertical como horizontal. Por esta razón, para medir la precisión de un sistema se proporcionan unos valores máximos de error para ambas dimensiones:

- **HNSE (Horizontal Navigation System Error).** Es el error horizontal del sistema de navegación. Para LPV-200 el valor máximo de HNSE es de 3 m (95 %).
- **VNSE (Vertical Navigation System Error).** Es el error vertical del sistema de navegación. Para LPV-200 el valor máximo de HNSE es de 4 m (95 %).

7.2.4. Integridad

La integridad se define como la medida de confianza de que la información que esté proporcionando un sistema sea correcta [35]. El concepto incluye, además, la capacidad de poder alertar al usuario cuando el sistema no deba ser usado para la navegación. Su definición completa engloba una serie de parámetros.

- **Límite de Alerta (AL).** Parámetro que representa el valor máximo de tolerancia del error de posición que no se debe superar sin emitir una alerta al usuario. Hay un límite de alerta horizontal (HAL) y otro vertical (VAL), que indican el error de posición máximo horizontal y vertical respectivamente, a partir del cual el sistema se debe declarar no disponible para su uso.
- **Tiempo de Alerta (TTA)** Es el tiempo máximo permitido desde que el sistema empieza a transmitir información engañosa hasta que se avisa al usuario de la situación. Los eventos de integridad serán aquellos en los que el tiempo del error en la información sea mayor al tiempo de alerta, ya que de este modo se avisa al usuario de que el sistema no funciona correctamente. Si los errores duran un tiempo muy pequeño, inferior al TTA, no se avisará al usuario y por tanto no se considerará estadísticamente en los cálculos de integridad.
- **Riesgo de integridad.** Parámetro estadístico que mide la probabilidad de que el error de posición (PE) exceda al límite de alerta. Este parámetro se emplea junto al tiempo de alerta para expresar el concepto de fallo de integridad.
- **Nivel de protección (PL).** Parametro estadístico que determina un valor límite del error calculado para garantizar que la probabilidad de que la posición absoluta del error exceda a dicho valor sea menor o igual que el riesgo de integridad. Existe un nivel de protección horizontal (HPL) y vertical (VPL), que delimitan un volumen entorno a la aeronave de manera que si el error de posición se encuentra dentro del mismo no se producirán fallos de integridad. De manera opuesta, los denominados fallos o eventos de integridad ocurrirán cuando el error de posición (horizontal o vertical) exceda el nivel de protección correspondiente.

Una vez introducidos los conceptos anteriores se pasa a hablar de los ya mencionados fallos de integridad, los cuales se pueden definir como eventos de integridad que

duran un tiempo mayor al TTA y durante el cual no se ha producido ningún error. Para medir por tanto los diferentes escenarios de integridad que pueden ocurrir teniendo en cuenta todos los parámetros se introduce el denominado Diagrama o Gráfico de Stanford, mostrado en la Figura 9.

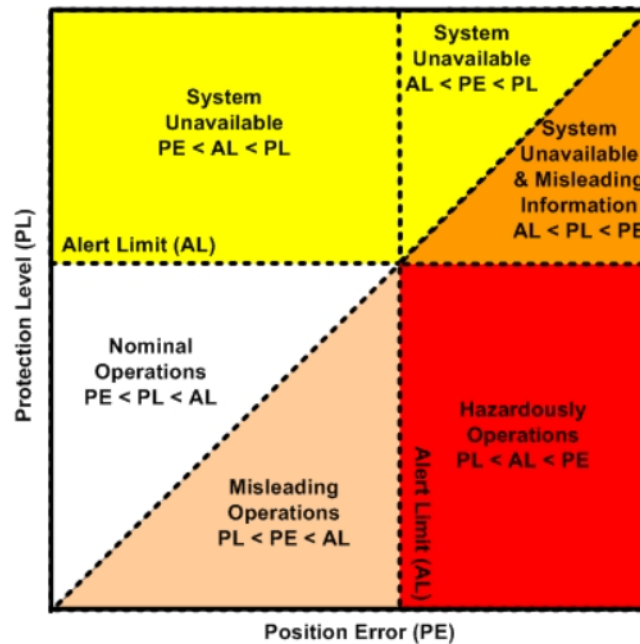


Figura 9: Diagrama de Stanford teórico [35].

En el diagrama se representa el nivel de protección PL frente al error de posición PE. En primer lugar se ve una línea diagonal que indica cuando el valor de PL es igual al de PE, dividiendo por tanto el gráfico en dos zonas. Además, para cada valor de coordenadas se establece el límite de alerta, que delimitará también las áreas del diagrama y será el punto a partir del cual la información sea engañosa.

En la parte superior de la diagonal y por debajo del AL, se halla el área de operaciones nominales, donde el sistema funciona correctamente puesto que se cumple que el AL sea mayor que el PL y este a su vez mayor que el PE. Por encima del AL, el sistema seguiría transmitiendo información pero no se encontraría disponible, puesto que no se puede garantizar que el nivel de protección sea mayor al límite de alerta y por lo tanto se pueden dar eventos de integridad en los que el sistema no avise al usuario.

En la parte inferior de la diagonal, cualquiera de las operaciones sería peligrosa ya que el error de posición será mayor que el límite de protección y por tanto no se podría garantizar la seguridad de la aeronave, además de que en algunos casos tampoco se garantiza la alerta al sistema y este se encuentra no disponible.

El diagrama de stanford permitirá por tanto un claro análisis de la integridad del sistema y será decisivo a la hora de determinar si se puede validar o no el aeropuerto de Alicante para LPV-200.

7.3. Fases de validación

El proceso de validación de un aeropuerto para cualquier procedimiento de navegación (LPV, APV, etc.) está regulado por la OACI y cuenta con tres fases y un posterior diseño de procedimientos para el propio aeropuerto.

- **Validación a largo plazo.** Es la primera fase a realizar. Consiste en un estudio para comprobar que se cumple con los requerimientos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad establecidos por la OACI y por el servicio SoL, durante un período de 6 meses en el área en la que se encuentra el aeropuerto. De este modo se procederá a analizar informes mensuales proporcionados por EGNOS para comprobar el rendimiento obtenido en cada uno de los 4 parámetros evaluados y verificar así el cumplimiento de los requerimientos. Los resultados de la validación a largo plazo se mostrarán en el capítulo 8.
- **Validación a corto plazo/ Campaña sobre el terreno.** La segunda fase consiste en la toma de datos, en este caso procedentes de la estación ERGNSS de ALAC, para su análisis mediante software. El objetivo es de nuevo ver si se cumple con los requerimientos establecidos por el SoL de EGNOS, con un muestreo de datos más específico ya que se trabajará en un período corto, que debe ser mayor de 36 horas, con datos medidos cada segundo. Esta fase abarcará la mayor parte del proyecto puesto que hay una serie de procedimientos a seguir tanto con el tratamiento de datos como con el uso de software, y se desarrollará en los capítulos 9 y 10.
- **Validación mediante ensayo de vuelo.** Si las dos primeras fases han sido validadas, se procede a la última etapa del proceso de validación, la cual consiste en una toma de datos reales mediante ensayo de vuelo. Se ubica un equipo con receptor SBAS en la aeronave y se realiza un procedimiento de aproximación hacia el aeródromo en el cual el sistema está obteniendo datos para ver si se cumplen con los requerimientos establecidos para el procedimiento en cuestión, en este caso LPV-200.

El objeto de este proyecto solo engloba la realización de las dos primeras fases, centrándose principalmente en la campaña sobre el terreno, para la cual se empleará el software de procesamiento de datos de navegación «Pegasus» desarrollado por Eurocontrol.

8. Validación a largo plazo

La fase de validación a largo plazo consiste en un análisis de las prestaciones del ESSP (European Satellite Services Provider) de EGNOS durante 6 meses para ver si se cumple con los requisitos PBN establecidos por la OACI para el procedimiento en cuestión, en este caso LPV-200. Se tomarán los resultados correspondientes al área en la que se encuentra el Aeropuerto de Alicante. Para poder realizar dicho estudio, se ha procedido a revisar los informes mensuales de rendimiento, desde Noviembre de 2019 hasta Abril de 2020. Estos informes se pueden encontrar en las referencias [36], [37], [38], [39], [40] y [41].

8.1. Disponibilidad

El estudio de disponibilidad se puede dividir en dos análisis según los informes del ESSP. El primero de ellos hace referencia a la disponibilidad satelital y el segundo a la disponibilidad temporal sobre el total.

8.1.1. Disponibilidad SIS

La disponibilidad SIS hace referencia al porcentaje de tiempo en un mes en el cual hay por lo menos un satélite retransmitiendo mensajes EGNOS. Se analiza por tanto el porcentaje individual de los satélites así como el del conjunto de los mismos. En la Figura 10 se puede ver los resultados de los últimos 6 meses para los satélites de EGNOS PRN123 y PRN136.

Availability (%)	2019-11	2019-12	2020-01	2020-02	2020-03	2020-04
PRN123	99.99	99.99	99.99	99.99	99.97	99.97
PRN136	99.99	99.99	99.97	100	99.94	99.97
At least one EGNOS GEO satellite	100	100	100	100	100	100

Figura 10: Disponibilidad en (%) de los satélites GEO de EGNOS [36]

Se puede comprobar como ambos satélites, independientemente, están disponibles durante un período superior al 99.9% de cada mes. Además, se garantiza que al menos uno de los dos va estar disponible durante el 100% del tiempo para cada uno de los meses. Por lo tanto, según estos datos la disponibilidad SIS cumple con los requisitos impuestos por OACI.

8.1.2. Disponibilidad (de servicio)

La disponibilidad, aludiendo al servicio que proporciona un sistema, es aquella que mide si el sistema estará disponible durante un tiempo determinado y con unos requerimientos concretos dentro de un área concreta. En este caso, para LPV-200 se debe cumplir un valor del HPL inferior a 40 m y un VPL inferior a 35 m. En la Figura 11, se pueden ver los resultados proporcionados por EGNOS en los informes mensuales.

Disponibilidad LPV-200 (%)						
REQUERIMIENTOS OACI:	HPL < 40 m y VPL < 35 m					
Mes de análisis	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20
Datos de EGNOS	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9	>99

Figura 11: Disponibilidad LPV-200 en (%).

Se observa como en cada uno de los 6 meses el requerimiento de HPL y VPL de OACI se cumple, estando el sistema siempre disponible como mínimo el 99 % del tiempo de medida, por lo que se puede afirmar que la disponibilidad del servicio es correcta.

8.2. Continuidad

La continuidad se evalúa con el parámetro denominado riesgo de continuidad (Continuity Risk), que según EGNOS se define como el resultado de la división del número total de eventos de continuidad durante un período de 15 segundos entre el número de muestras en las que se ha obtenido una solución válida y disponible para LPV-200. Atendiendo a este parámetro se ha procedido a revisar los informes mensuales y se han obtenido los resultados de riesgo de continuidad mostrados en la Figura 12.

Continuidad LPV-200						
Mes de análisis	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20
Datos de EGNOS	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0005

Figura 12: Riesgo de continuidad para LPV-200.

El rango óptimo de continuidad establecido por OACI es un valor comprendido entre $1 \cdot 10^{-6}$ y $8 \cdot 10^{-6}$. A simple vista que los valores obtenidos en EGNOS distan de entrar en el rango recomendado por lo que se puede afirmar en primera estancia que no se cumple el requerimiento PBN de continuidad.

Sin embargo, ya se ha mencionado que desde OACI se establece que estos datos se pueden emplear para la navegación siempre y cuando que se produzca un fallo este pueda ser mitigado debidamente. De este modo el SoL de EGNOS establece unos valores máximos óptimos de continuidad de $1 \cdot 10^{-4}$ o $5 \cdot 10^{-4}$ y como se puede observar estos valores se alcanzan en todos los meses, luego se puede considerar que de acuerdo a la continuidad el sistema funciona correctamente y se puede emplear para la navegación mediante LPV-200.

8.3. Precisión

La precisión se define como el percentil 95º de los errores del sistema de navegación horizontal (HNSE) y vertical (VNSE) durante un mes, siempre y cuando el sistema se encuentre disponible, es decir con unos niveles de HPL y VPL inferiores a 40 y 35 m

respectivamente.

Los valores de precisión se toman de los datos medidos en las diferentes estaciones RIMS de EGNOS. Empleando la herramienta «EDAS DGNSS Coverage Map» proporcionada por el ESSP, se puede determinar que la estación más cercana al Aeropuerto de Alicante es la de Palma de Mallorca, tal y como se aprecia en la Figura 13.

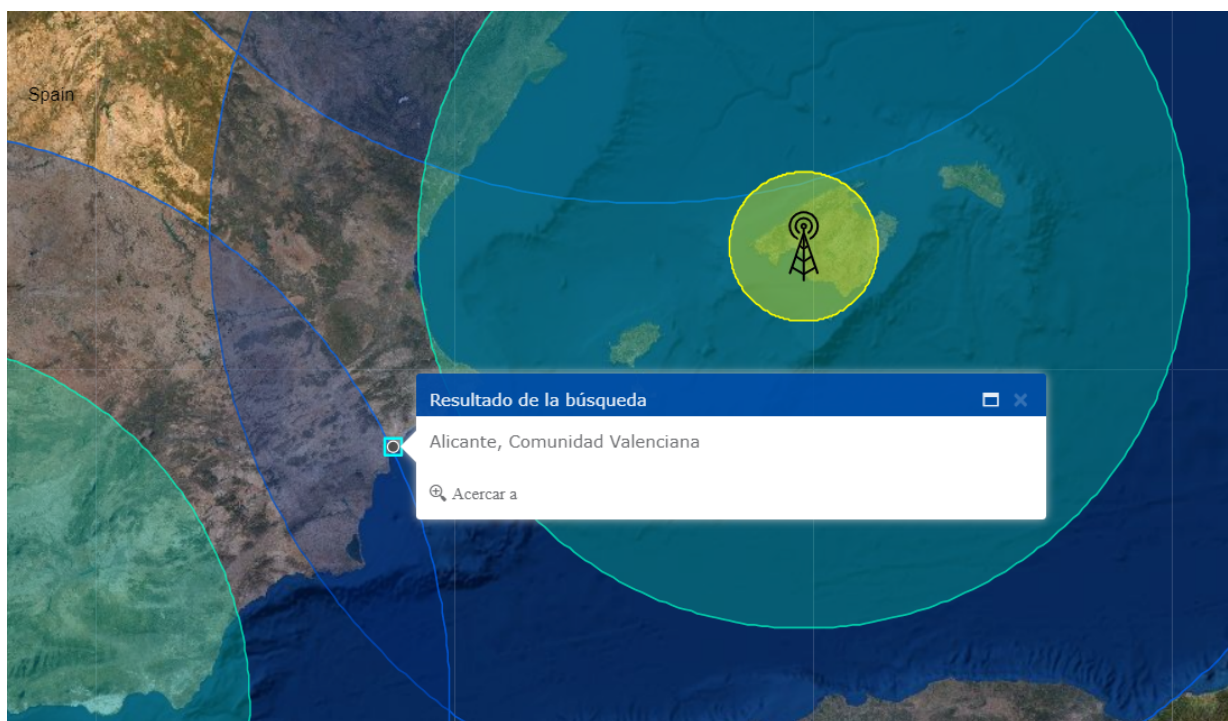


Figura 13: Mapa de cobertura GNSS EGNOS. Ubicación de Alicante

Por lo tanto, se estudiarán los datos mensuales proporcionados por la RIM de Palma para los 6 meses, los cuales se adjuntan en la Figura 14.

Precisión LPV-200 (Palma de Mallorca)						
Mes de análisis	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20
HNSE (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
VNSE (m)	0,9	0,9	0,9	1	1	1

Figura 14: HNSE y VNSE de la RIM de Palma de Mallorca

Las prestaciones que garantiza EGNOS para LPV-200 son un valor de VNSE inferior a 4 m y un valor de HNSE inferior a 3 m, los cuales se cumplen en todo momento de manera muy eficaz, con precisión prácticamente submétrica. Sin embargo, estos valores tan óptimos se deben a que son los que proporciona la RIM en su área de cobertura RTK (Real Time Kinematic), que se corresponde al círculo de color amarillo de la Figura 13. En una primera instancia se puede establecer que los datos de precisión de la RIM

son válidos de acuerdo a lo estipulado por el SoL, no obstante se verificará en la campaña sobre el terreno el cumplimiento exacto de los requerimientos para la ubicación del aeropuerto de Alicante.

8.4. Integridad

El término «evento de integridad» hace referencia a la situación que se produce cuando el error del sistema de navegación (NSE) es mayor o igual al nivel de protección (PL) establecido para LPV-200. La integridad se mide a partir de un parámetro conocido como índice de seguridad (Safety Index), el cual se define como la relación entre el NSE y el PL, de manera que si este valor es superior a 1 quiere decir que se ha dado un caso de información confusa indicando un fallo en la integridad del sistema.

Para evaluar la integridad en este caso se analizarán los valores obtenidos de índice de seguridad, tanto a nivel horizontal (HSI) como vertical (VSI). Los resultados proporcionados por EGNOS durante los 6 meses de análisis se muestran en la Figura 15.

Integridad LPV-200						
Mes de análisis	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20
HSI	0,23	0,28	0,31	0,26	0,25	0,25
VSI	0,36	0,33	0,41	0,43	0,36	0,34

Figura 15: Índice de seguridad horizontal y vertical. LPV-200

En los resultados se puede comprobar que los valores de HSI y VSI son inferiores a 1 en todo momento, por lo que se puede afirmar que la prestación de integridad cumple con los estándares de OACI.

9. Validación a corto plazo

En esta sección se describirán los procedimientos seguidos para realizar la segunda fase de validación, a través de una campaña sobre el terreno en la cual se procesarán los datos recibidos durante 5 días consecutivos, desde el 14/05/2020 hasta el 18/05/2020, ambos incluidos.

En primer lugar se realizará una explicación del formato de los datos empleados en la navegación por satélite, principalmente atendiendo a aquellos relacionados con la aeronáutica. A partir del conocimiento de dichos datos se explicará como se ha procedido para la validación, desde la obtención y el procesado de información hasta la generación de resultados. En este capítulo se describirán todos los procedimientos seguidos con el tratamiento de datos y el uso de software, y los resultados que muestran las prestaciones obtenidas se analizarán en el capítulo 10.

Antes de comenzar, cabe mencionar que para la realización de esta fase se contactó con un responsable de software GNSS de Eurocontrol, David Duchet, quien proporcionó información y orientación para el trabajo con el software y tratamiento de datos. Durante el transcurso de la presente validación de campaña sobre el terreno surgieron algunos errores que se contrastaron y corrigieron con su ayuda.

9.1. Formato de datos

La navegación por satélite cuenta con varios formatos de transmisión de datos, empleados para distintos campos. Algunos de ellos son [42]:

- **RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics).** Es un formato empleado principalmente en la aviación y desarrollado para enviar las correcciones realizadas en los sistemas locales. Surge a raíz de la creación de la organización estadounidense con mismo nombre (RTCA), que actúa como institución consultiva en el campo de la navegación y procesado de datos.
- **RTCM (Radio Technical Commission for Maritim Services).** De manera análoga al RTCA, la RTCM es una organización consultiva que regula y hace recomendaciones de navegación. Este formato se emplea para la transmisión de datos con correcciones a usuarios del sistema GPS y se emplea principalmente en el sector naval y terrestre.
- **NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol).** Es un formato que envía a través de la telefonía móvil los datos comprimidos con las correcciones diferenciales, de manera que constituye un protocolo de transmisión de datos RTCM mediante internet.
- **RINEX.** Es un formato fácil de leer por cualquier software ya que sus archivos están escritos en código ASCII (código de caracteres basado en el alfabeto latino). A continuación se explicarán en detalle su estructura y características.

9.1.1. Formato RINEX

El término RINEX (Receiver Independent Exchange Format) hace referencia a un formato de intercambio de datos en crudo para los sistemas de datos de navegación mediante satélite. Originalmente fue creado para el procesado de datos de la constelación GPS, pero en la actualidad se ha adaptado a otras constelaciones como GLONASS.

RINEX ha presentado varias versiones desde su comienzo. Actualmente se emplea la versión RINEX 2.11, la cual permite almacenar valores de pseudorángos de frecuencias portadoras así como medidas Doppler para constelaciones como GPS y GLONASS, y también para sistemas de aumentación como EGNOS o WAAS, lo que permite emplear el formato para el tratamiento de datos que se debe hacer en este proyecto. El formato RINEX presenta tres tipos de ficheros ASCII:

- **Archivos de Observación.** En ellos se hallan los datos tomados por las estaciones ERGNSS.
- **Archivos de Navegación.** Contienen datos procedentes de GPS o GLONASS a procesar para la obtención del posicionamiento mediante correcciones.
- **Archivos de datos meteorológicos.** Son archivos con datos cuyo propósito es proporcionar información de meteorología, por lo que no serán utilizados en este proyecto.

Los ficheros RINEX de segunda versión, que son los que se tratarán en este TFG, presentan una nomenclatura común, definida en [43]:

SSSSDDDX.YYT.Z

- **SSSS:** Identificador de la estación ERGNSS, en el caso de Alicante es: *ALAC*.
- **DDD:** Día del año en el que se registraron los datos del fichero RINEX
- **X:** Para los ficheros diarios a 30 segundos, este carácter toma el valor '0'. Para los ficheros horarios a 1 segundo, este carácter toma un valor entre 'A' y 'X', en acuerdo a la hora del día (A: 0:00; B: 1:00, C: 2:00 ... W: 22:00; X: 23:00).
- **YY:** Año en el que se registraron los datos del fichero RINEX.
- **T:** Indica si el fichero es de observaciones (RINEX: 'o', Hatanaka: 'd'), de efemérides GPS ('n') o de efemérides GLONASS ('g').
- **Z:** indica que es un fichero de compresión binaria.

9.2. Obtención de datos

El procedimiento de validación se realizará mediante el software PEGASUS. Para trabajar con él se necesitarán tres tipos de ficheros: observación, navegación y SBAS. Los dos primeros se pueden encontrar en la base de datos de la página web oficial del IGN, en el apartado de «Descarga de Ficheros Rinex», mientras que al fichero SBAS se accederá de otra forma, puesto que contiene datos de aumentación de EGNOS.

9.2.1. Ficheros de Navegación (.N)

El IGN presenta una interfaz de descarga de datos en la que se puede elegir el día y la estación ERGNSS y también el intervalo de observación, que puede ser diario u horario. Un extracto de la interfaz en cuestión se puede visualizar en la Figura 16.

The screenshot shows a web interface for downloading RINEX data. It is divided into two main sections: '2. Selecciona día' and '3. Selecciona intervalo de observación'. In section 2, the date '14/05/2020' is entered. In section 3, the 'Horarias (sólo disponibles últimos 90 días)' option is selected. The 'Intervalo entre observaciones' is set to '1 segundo' and the 'Selección de hora UTC' is '02 h. - 03 h.'. Below these sections, there are input fields for 'Nombre de Estación:' (ALAC), 'Fecha:' (14/05/2020), and 'Observaciones:' (Horarias a 1 segundo). A 'Buscar' button is located at the bottom right. Below the form, a table displays the search results.

Resultados (NOTA: no todos los ficheros dispuestos están disponibles)	
Observaciones	ftp://ftp.geodesia.ign.es/ERGNSS/horario_1s/20200514/ALAC135C.20d.z
Efemérides GPS	ftp://ftp.geodesia.ign.es/ERGNSS/horario_1s/20200514/ALAC135C.20N.z

Figura 16: Interfaz de Descarga de datos RINEX. IGN.

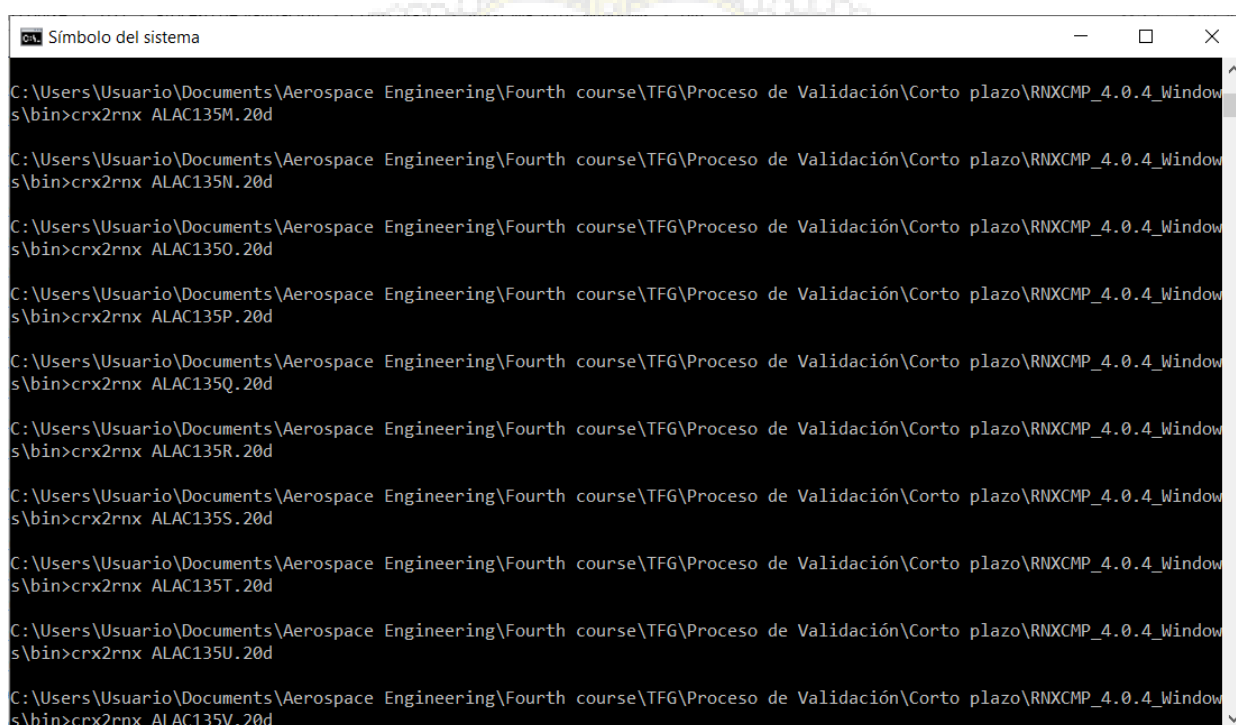
En primer lugar, se trató de emplear datos diarios con información cada 30 segundos. Sin embargo, estos datos no proporcionaban soluciones ya que eran demasiado escasos. Se contrastó esta información con el contacto de Eurocontrol, quien recomendó el empleo de datos horarios con observaciones cada segundo para obtener una mayor fiabilidad de los datos. En dicha interfaz, por lo tanto, se ha seleccionado la estación de ALAC y un intervalo horario, con datos medidos cada segundo. Como resultado, se ha obtenido para cada uno de los 5 días de estudio 24 ficheros (.n). Además se han descargado 24 ficheros de extensión (.d) que se tratarán a continuación para obtener los denominados ficheros de observación.

9.2.2. Ficheros de Observación (.O)

Los ficheros de observación se obtendrán a partir de los archivos (.d) descargados del IGN, los cuales están en un formato comprimido denominado Hatanaka. Para obtener

el archivo de datos de observación en formato RINEX (.O), se deberá emplear el software libre Hatanaka mediante la ventana de comandos de windows. Dentro del paquete de este software se empleará la función `crx2rnx`, que permitirá descomprimir los archivos (.d) a archivos de observación. Este proceso se debe realizar para cada uno de los 24 archivos, tal y como se muestra en la Figura 17.

En dicha Figura se puede observar como por ejemplo se aplica la función a los archivos «ALAC135(Letra).20d» donde cada letra se corresponde a una franja horaria de datos obtenidos cada segundo. De este modo se obtienen los 24 archivos de observación. Además, cabe mencionar que este procedimiento se ha realizado para el día 14 de Mayo de 2020, que es el número 135 del año. Para realizar la validación correctamente se debe realizar del mismo modo la descarga y procesado de los tres tipos de ficheros para los otros 4 días restantes.



```
Símbolo del sistema
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135M.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135N.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135O.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135P.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135Q.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135R.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135S.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135T.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135U.20d
C:\Users\Usuario\Documents\Aerospace Engineering\Fourth course\TFG\Proceso de Validación\Corto plazo\RNXCMP_4.0.4_Window
s\bin>crx2rnx ALAC135V.20d
```

Figura 17: Uso de la herramienta `crx2rnx` de Hatanaka

9.2.3. Ficheros SBAS (.B)

Finalmente, para la obtención de los ficheros SBAS se ha procedido a contactar con el soporte técnico de EGNOS, con el objetivo de registrar una cuenta en el servicio EDAS (EGNOS Data Access System) de la organización. De este modo se podría acceder a un servidor FTP (File Transfer Protocol), en el que se encuentran datos SBAS almacenados por EGNOS y agrupados en días.

EGNOS proporcionó un manual [44] que indica como se podía acceder al servidor FTP mediante el usuario y contraseña otorgados al cumplir el registro en sus servidores.

Para ello, era necesario el empleo de un software que permitiera el acceso a este tipo de servidores. Este tipo de software estaba recomendado por el manual en cuestión y se eligió emplear WinSCP, de manejo bastante simple.

Tras configurar los parámetros de acceso tal y como se especifica en el documento de ayuda hubo algunos problemas que se solucionaron gracias al cambio de IP mediante la conexión a otra red de acceso a internet. Finalmente, al acceder al servidor en cuestión se navegó por las carpetas hasta encontrar las correspondientes a los 5 días de validación (Desde el 135 hasta el 139). Obteniendo en cada caso la interfaz mostrada en la Figura 18.

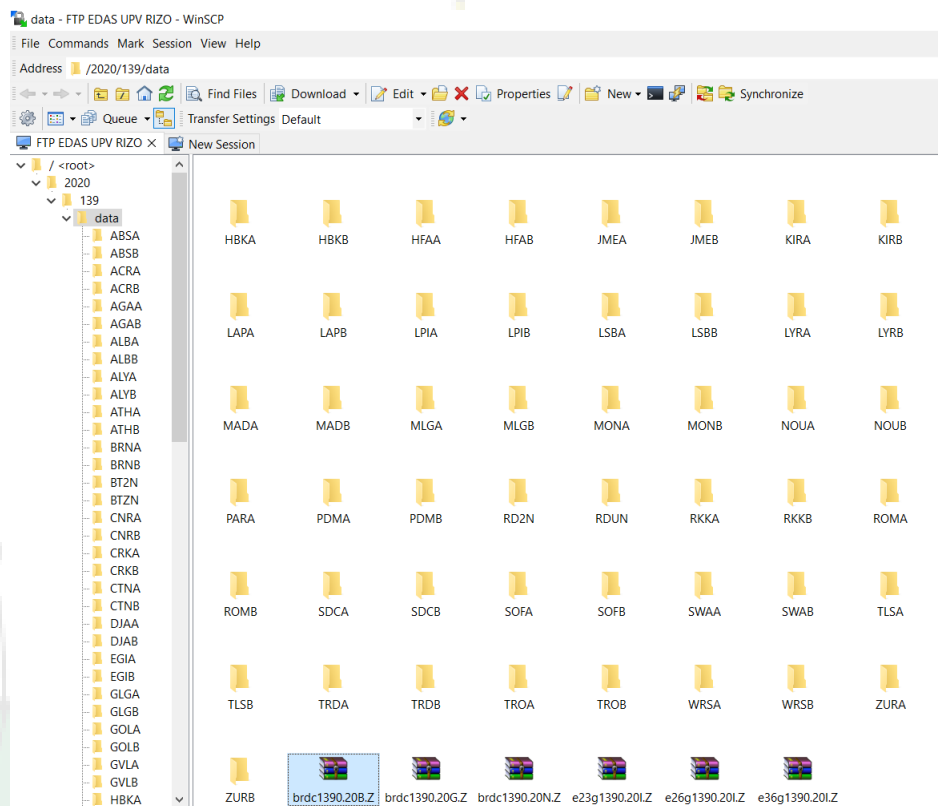


Figura 18: Interfaz del servidor FTP mediante acceso con WinSCP

Se puede ver como el fichero SBAS es el denominado «brdc139.20B.Z» El cual al descargarlo y comprimirlo contiene la información necesaria de datos SBAS de EGNOS para un día, en este caso el archivo es el del día 139 (18 de Mayo). Repitiendo este proceso para los otros 4 días de obtiene finalmente un total de 5 ficheros SBAS de extensión (.B). Cabe añadir que el nombre del archivo se modificará para que tenga la nomenclatura exactamente igual que los otros dos, es decir, para el día 139 el archivo SBAS pasará a llamarse: *ALAC1390.20B*

9.3. Estructura de Datos

Llegados a este punto se tienen 24 ficheros de observación, 24 de navegación y 5 ficheros SBAS. Para poder emplear el software Pegasus es necesario que se ejecute un único fichero de cada tipo por día, por lo que se deberá utilizar una herramienta de software libre adicional, conocida como TEQC. Esta herramienta se emplea de una manera similar al Hatanaka, desde la ventana de comandos, y su función consiste en concatenar los 24 archivos en cuestión en un único fichero. Este procedimiento se debe realizar exactamente igual para los ficheros de navegación y para los de observación, siguiendo el código mostrado en la Figura 19, donde se realiza la concatenación para los ficheros de observación del día 135.

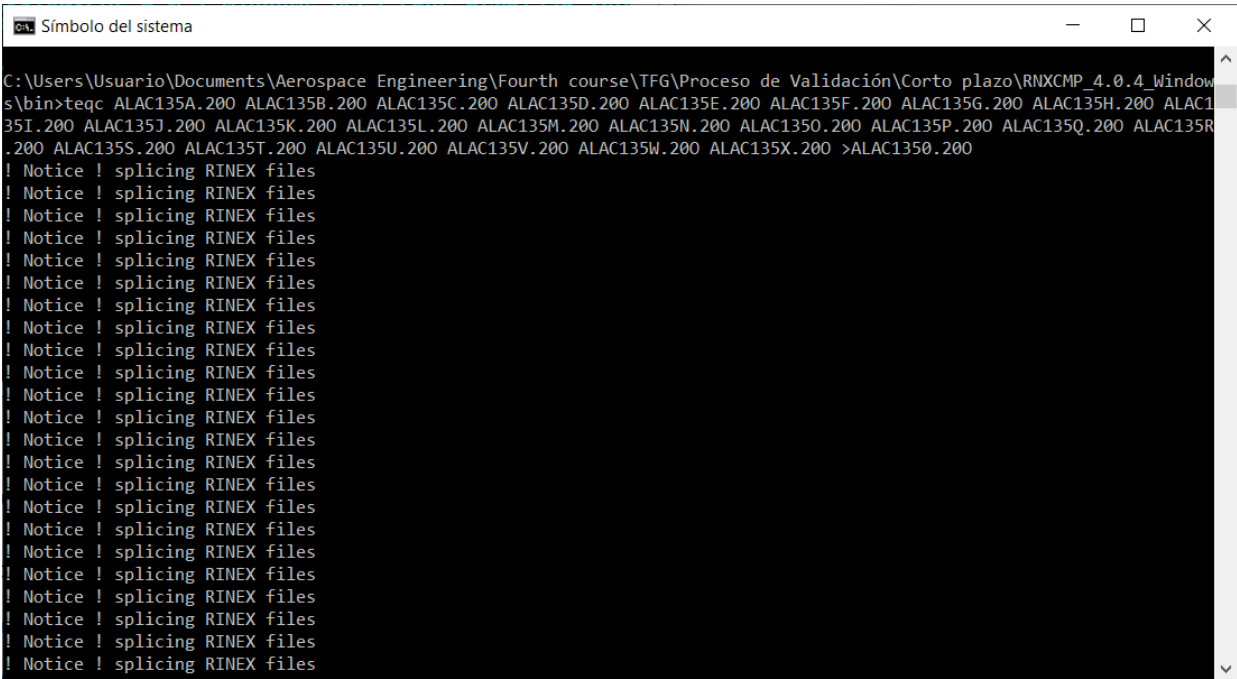


Figura 19: Empleo del software de concatenación TEQC

Tras realizar esta operación para ambos conjuntos de ficheros y se obtienen 3 archivos a ejecutar para cada uno de los días, mostrados en la Figura 20. Antes de comenzar a trabajar con el software, se explicará la estructura interna de los datos que hay en cada fichero.

ALAC1350.20B	15/05/2020 0:14	Archivo 20B	34.891 KB
ALAC1350	03/06/2020 14:01	Archivo 20N	128 KB
ALAC1350	03/06/2020 13:54	Archivo 20O	186.077 KB

Figura 20: Archivos a procesar: SBAS, Navegación y Observación

En las Figuras 21, 22 y 23 se puede observar el contenido de cada uno de los 3 tipos de ficheros utilizados en este proyecto. A continuación se pasará a analizar cada uno de ellos.

```

2.11      OBSERVATION DATA      M (MIXED)      RINEX VERSION / TYPE
teqc 2019Feb25      20200603 11:54:15UTCPGM / RUN BY / DATE
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|=+ COMMENT
teqc 2019Feb25      IGN-E      20200514 01:03:35UTC COMMENT
Linux 2.6.32-573.12.1.x86_64|x86_64|gcc -static|Linux 64|=+ COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION      COMMENT
ALAC      MARKER NAME
13433M001      MARKER NUMBER
Area de Geodesia      Instituto Geografico Nacional      OBSERVER / AGENCY
1831552      LEICA GR25      4.11/6.524      REC # / TYPE / VERS
10250007      LEIAR25.R3      LEIT      ANT # / TYPE
5009051.3860      -42072.4860      3935057.4820      APPROX POSITION XYZ
3.0350      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1      WAVELENGTH FACT L1/2
7 L1 L2 L5 C1 P2 S1 S2      # / TYPES OF OBSERV
1.0000      INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 1 seconds      COMMENT
DefaultJobName      COMMENT
DefaultUserDiscription      COMMENT
Project creator:      COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9]      COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9)      COMMENT
teqc edited: all Galileo satellites excluded      COMMENT
18      LEAP SECONDS
2020 5 14 0 0 0.0000000 GPS      TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
20 5 14 0 0 0.0000000 0 20G02G03G04G05G06G07G09G17G19G30R04R05
R06R07R14R15R16R20R21R22
119005009.318 8 92731165.08946      22645896.800      22645890.360
49.850      40.950
128925362.250 7 100461360.37947 96275488.581 8 24533667.800      24533667.360
45.650      45.200
118803885.750 8 92574475.17246 88717236.059 8 22607614.280      22607611.360
48.250      39.300
129305308.514 7 100757364.61845      24605981.220      24605978.620
43.600      33.500
108654769.186 8 84666063.96648 81138324.667 8 20676308.880      20676307.620
50.200      50.200
114542513.550 8 89253941.14348      21796715.700      21796711.580
49.750      49.800
108167107.612 8 84286072.51048 80774168.804 8 20583503.280      20583500.980

```

Figura 21: Estructura del fichero de observación

En primer lugar, el fichero de observación cuenta con las siguientes partes:

- **RINEX VERSION / TYPE:** Indica la versión de los datos RINEX, que actualmente es la 2.11 así como el tipo de archivo, que en este caso es de observación, además proporciona información del sistema satélite: G(GPS), R(GLONASS), M(Mixto).
- **PGM / RUN BY / DATE:** Incluye información del programa de creación del fichero

(TEQC), así como la fecha y hora en la que se creó.

- **COMMENT:** Encabezado que alude a la inclusión de comentarios informativos.
- **MARKER NAME:** Identificador de la estación de observación: ALAC.
- **MARKER NUMBER:** Número identificativo de la estación de observación.
- **OBSERVER / AGENCY:** Nombre de la agencia observadora, en este caso el IGN.
- **REC # / TYPE / VERS:** Número de receptor, tipo y versión software del mismo,
- **ANT # / TYPE:** Número y tipo de antena.
- **APPROX POSITION XYZ:** Posición aproximada del punto de observación en coordenadas cartesianas.
- **ANTENNA: DELTA H/E/N:** Información de la altura de la antena así como de las excentricidades del Este y Norte.
- **WAVELENGTH FACT L1/2:** Factores de longitud de onda. Se indica un factor para cada PRN, significando un 1 que el ciclo está completo, un 2 que el ciclo es medio y un 0 en L2 que únicamente se trabaja con una frecuencia. En este caso L1 y L2 presentan un 1, por lo que funcionan con normalidad y presentan ciclos de longitud de onda completos.
- **# / TYPES OF OBSERV:** Número y tipo de los observables grabados. En este archivo hay 7 observables, correspondiéndose 3 de ellos a las medidas de frecuencia L1, L2 y L5; C1 a la pseudodistancia de código medida en L1; P1 y P2 a las pseudodistancias de fase en L1 y L2 y finalmente S1 y S2 hacen referencia a las dos señales recibidas.
- **INTERVAL:** Es el intervalo de observación entre las medidas. Como ya se ha explicado anteriormente, es de 1 segundo.
- **LEAP SECONDS:** Salto de segundos que se emplea en ficheros mixtos, como ocurre en este caso.
- **TIME OF FIRST OBS:** Indica el instante de tiempo de la primera observación: 14/05/2020 a las 00:00 h.
- **END OF HEADER:** Indica el fin del encabezado
- **OBS RECORD:** Finalmente se muestran los datos medidos de observación, incluyendo información de la época medida, de si la señal es correcta o no, de los valores de observables, errores de reloj y lista de los PRNs actuales.

```

2.11          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
teqc 2019Feb25          20200603 12:01:41UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|=+ COMMENT
teqc 2019Feb25          IGN-E          20200514 01:03:35UTC COMMENT
Linux 2.6.32-573.12.1.x86_64|x86_64|gcc -static|Linux 64|=+ COMMENT
                                END OF HEADER
1 20  5 13 23 59 44.0-3.792899660766D-04-6.707523425575D-12 0.000000000000D+00
  2.000000000000D+01-4.125000000000D+01 4.298036149208D-09-2.952613444704D+00
-2.250075340271D-06 9.834467666224D-03 4.317611455917D-06 5.153627698898D+03
  3.455840000000D+05-3.725290298462D-09-2.959246822908D+00-1.937150955200D-07
  9.802956995364D-01 3.065937500000D+02 7.750106872431D-01-7.978189664470D-09
  8.071764784345D-11 1.000000000000D+00 2.105000000000D+03 0.000000000000D+00
  2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 5.122274160385D-09 2.000000000000D+01
  3.456000000000D+05
2 20  5 14  0  0  0.0-4.554172046483D-04-6.252776074689D-12 0.000000000000D+00
  5.000000000000D+01-3.140625000000D+01 4.665551500693D-09-2.706248418544D+00
-1.473352313042D-06 1.971211598720D-02 3.790482878685D-06 5.153699331284D+03
  3.456000000000D+05 3.371387720108D-07-3.035229939453D+00 1.750886440277D-07
  9.592904210165D-01 3.008437500000D+02-1.630708571409D+00-7.979974903094D-09
  1.957224382565D-10 1.000000000000D+00 2.105000000000D+03 0.000000000000D+00
  2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-1.769512891769D-08 5.000000000000D+01
  3.456000000000D+05

```

Figura 22: Estructura del fichero de Navegación

El fichero de navegación, por su parte, suele ser distinto para cada constelación, aunque siguiendo unas pautas generales ya que el objetivo es proporcionar unos datos concretos. Presenta un encabezado más sencillo, con algunas líneas iguales a las del archivo de observación.

- **RINEX VERSION / TYPE:** Indica la versión de los datos RINEX, en este caso 2.11 así como el tipo de archivo, que en este caso es de navegación por satélite GPS: N.
- **PGM / RUN BY / DATE:** Incluye información del programa de creación del fichero (TEQC), así como la fecha y hora en la que se creó.
- **COMMENT:** Encabezado que alude a la inclusión de comentarios informativos.
- **END OF HEADER:** Indica el fin del encabezado
- **Datos de navegación:** Se dividen en diferentes grupos y proporcionan información acerca de los datos orbitales de la constelación y de la precisión en la medida de pseudodistancias. Además, incluyen información sobre los parámetros de los relojes así como del modelo de ionosfera que se emplea para las correcciones.

```

2.10      B SBAS DATA      RINEX VERSION / TYPE
EDAS      ESSP              13-05-20 2359      PGM / RUN BY / DATE
                                                COMMENT
                                                END OF HEADER

136 20 05 14 00 00 0.0 L1 32 0 SBA
  3 53 0C 80 00 01 3F EB FF C0 00 00 3F EC 00 00 00 00 C0
    00 00 3F CF 99 D7 B9 7B 97 BA 30 F0 CB 40
123 20 05 14 00 00 0.0 L1 32 0 SBA
  3 53 0D C0 00 01 3F EB FF 80 00 00 3F EC 00 00 00 00 80
    00 00 3F D3 99 97 B9 7B 97 BA 3B 72 CF 80
136 20 05 14 00 00 1.0 L1 32 0 SBA
  24 9A 63 FC C0 00 00 00 00 00 01 7B BB 82 A0 22 9D F1
    FA 82 80 00 8C 80 1F FF E0 07 11 D7 61 C0
123 20 05 14 00 00 1.0 L1 32 0 SBA
  24 9A 63 FC C0 00 00 00 00 00 01 7B BB 83 A0 1E B9 ED
    00 03 00 61 0C 00 40 BF D8 15 AF 72 DB 80
136 20 05 14 00 00 2.0 L1 32 0 SBA
  18 C6 49 4C 00 00 00 00 00 00 40 00 01 F0 00 03 F8 00 03
    FC 00 03 FE 00 01 FF 00 01 FF BA E2 F8 00
123 20 05 14 00 00 2.0 L1 32 0 SBA
  26 C6 68 C3 FD FF EF FF 7F FB FF DF FE FF F7 FF BF FD FF
    EF FF 7F FB FF DF FE FF F7 80 06 FE 3A C0
136 20 05 14 00 00 3.0 L1 32 0 SBA
  2 53 08 80 03 FE C0 07 FD 40 03 FC 80 00 02 00 00 00 00
    00 00 00 03 99 99 57 97 BB BB A0 1F A3 80
123 20 05 14 00 00 3.0 L1 32 0 SBA
  2 53 0A C0 03 FE 80 0B FD 00 07 FC 80 00 02 00 00 00 00
    00 00 00 03 99 99 57 97 BB BB 8C 25 50 80
136 20 05 14 00 00 4.0 L1 32 0 SBA
  3 9A 0D 80 00 01 3F EB FF C0 00 00 3F EC 00 00 00 00 80
    00 00 3F D3 99 D7 B9 7B 97 BA 04 1C 9E C0
123 20 05 14 00 00 4.0 L1 32 0 SBA
  3 9A 0E C0 00 01 3F EB FF 80 00 00 3F F0 00 00 00 00 C0
    00 00 3F D3 99 97 B9 7B 97 BA 32 4B 8E 40
136 20 05 14 00 00 5.0 L1 32 0 SBA
  24 C6 63 FC C0 00 00 00 00 00 01 7B BB 82 80 36 A2 01
    03 83 00 B0 C3 3E BF BF C0 07 27 B2 B8 C0
123 20 05 14 00 00 5.0 L1 32 0 SBA
  24 C6 63 FC C0 00 00 00 00 00 01 7B BB 83 80 36 A2 01
    03 82 C0 B0 C3 3E BF CF C0 07 BC 9D 0E C0
136 20 05 14 00 00 6.0 L1 32 0 SBA

```

Figura 23: Estructura del fichero de SBAS

La estructura de los ficheros SBAS cuenta con la misma cabecera que la de navegación y luego muestran los datos de SBAS en dos grupos, uno para cada PRN (123 y 136).

9.4. Tratamiento de datos mediante Pegasus

Para proceder a comprobar si se cumplen los requerimientos impuestos para la aproximación mediante LPV-200 en Alicante, como ya se ha mencionado, se empleará el software de tratamiento de datos GNSS desarrollado por Eurocontrol: Pegasus, siguiendo una guía proporcionada por el tutor así como las indicaciones del contacto de eurocontrol.

Pegasus es un software que permite el empleo de herramientas y módulos para obtener requisitos GNSS como precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, así como para realizar simulaciones de trayectorias con cálculo de errores en la misma. Existen dos formas de trabajar con Pegasus: mediante el empleo de módulos o mediante la generación de un escenario. En este trabajo se empleará el acceso a módulos independientes en lugar de trabajar con escenarios, ya que es la manera más sencilla de tratar los datos obtenidos. Concretamente se utilizarán 3 módulos, explicados a continuación.

9.4.1. Módulo Convertor

El primer paso para trabajar con Pegasus es el empleo del módulo Convertor, cuya interfaz se muestra en la Figura 24. Previamente a trabajar con este y el resto de módulos, cabe mencionar que los tres archivos de datos a procesar deben introducirse en la misma carpeta que contiene a los módulos, en este caso era: **C:\Pegasus \Software**.

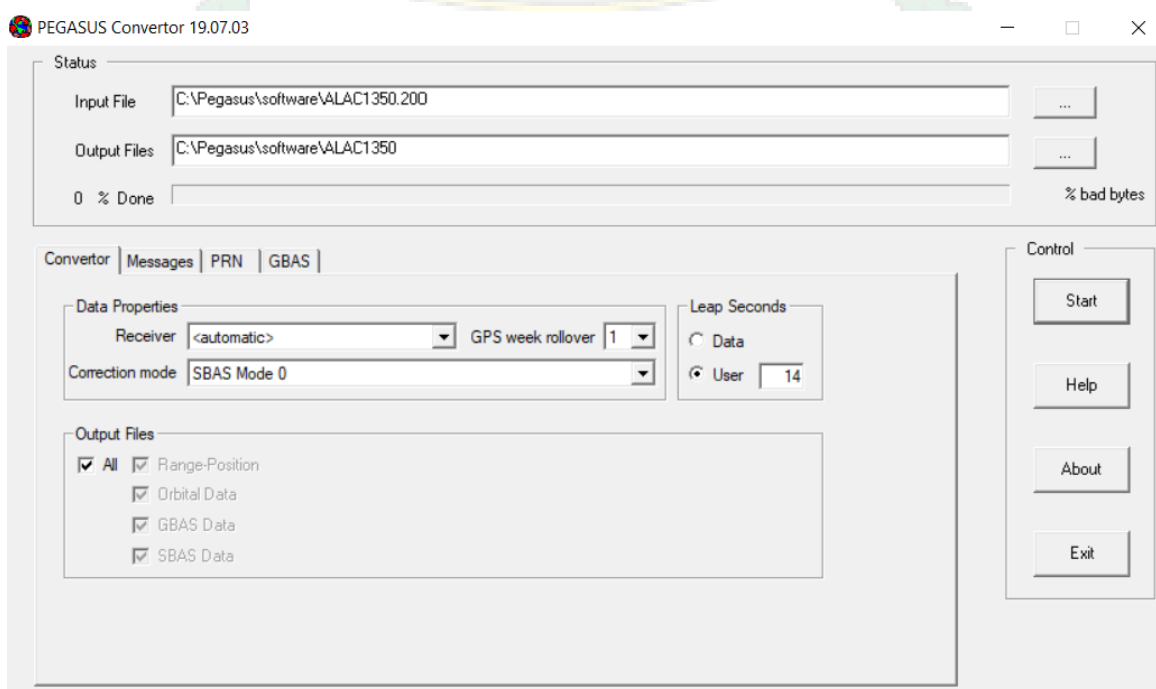


Figura 24: Interfaz del módulo Convertor

El procedimiento seguido es sencillo, pues únicamente hay que seleccionar el modo de correcciones SBAS y introducir en el apartado de inputfile el nombre del fichero de observación, que en este caso era **ALAC1350.200**. Como en la carpeta en cuestión se

han introducido los 3 ficheros, los cuales presentan la misma nomenclatura, el propio software detectará al fichero SBAS y de navegación correspondiente y los empleará para realizar su función, que es generar un documento de extensión `cnv.rng` que será el que se introduzca en el módulo `GNSS_solution` para obtener las prestaciones.

9.4.2. Módulo `GNSS_Solution`

El archivo de extensión `RNG` obtenido en el Convertor se debe introducir en el `GNSS_Solution`, junto con unos parámetros concretos de configuración. La interfaz del módulo en cuestión se muestra en la Figura 25.

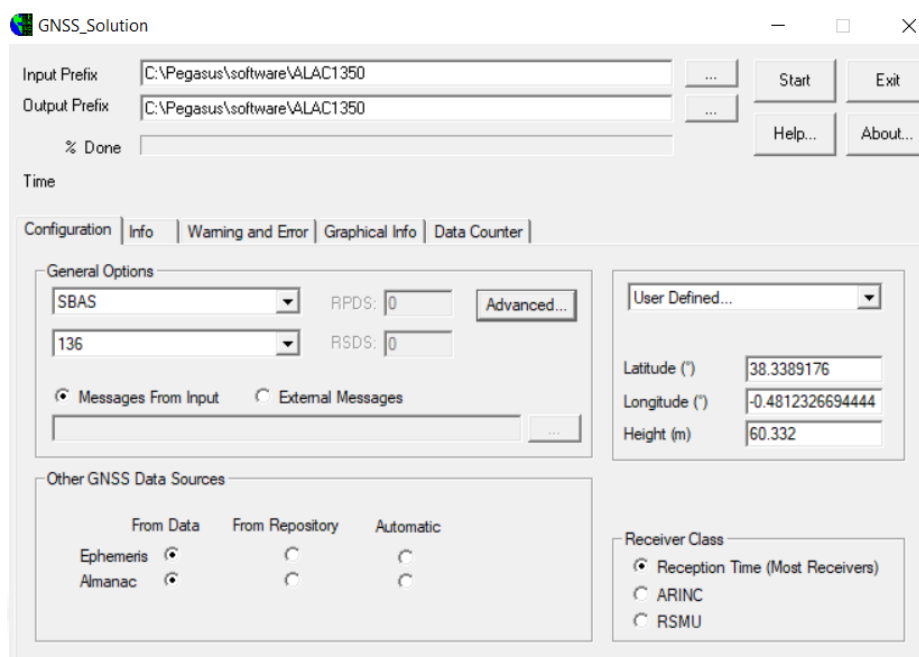


Figura 25: Interfaz del módulo `GNSS_Solution`

De manera análoga al convertor, se debe introducir el archivo input desde la carpeta `software` ya mencionada y automáticamente se generarán los resultados en la misma. En cuanto a la configuración hay varios puntos a tener en cuenta:

- En el apartado de Opciones generales (**General options**) se debe escoger el tipo de datos a procesar, dependiendo de si se trata de sistemas de aumentación, constelaciones, etc. En este caso se selecciona `SBAS` y se pasa a tomar los datos procedentes de uno de los satélites de `EGNOS` que actualmente está operativo: `PRN 136`. También se podría haber hecho la medición con el `PRN 123`, e incluso con el `PRN120`, no obstante se contrastó con el contacto de Eurocontrol que los datos de este último serían insuficientes para la validación mediante `pegasus`, ya que es un satélite enfocado exclusivamente a la realización de tests.
- Se debe definir además la estación desde la cual se han obtenido los datos de observación y navegación (`ALAC`), mediante la información proporcionada en su

Reseña de Estación Permanente. Para definir dichos parámetros se ha procedido a indicar la latitud, longitud y altitud de la estación, tal y como se puede observar en la Figura 25.

- Finalmente dentro del menú de opciones avanzadas se deberá proceder a ignorar el almanaque y a desactivar el «smoothing» de datos, que pueda ocasionar pérdidas de información.

Es importante añadir que se ha considerado suficiente el estudio de datos para un único PRN. Por ello, las prestaciones a obtener serán óptimas, pero podrán ser incluso mejores al procesar las prestaciones reales en una validación profesional, ya que al incluir ambos PRN la redundancia de satélites dará lugar a una mayor disponibilidad de señal y por tanto del servicio SoL.

Una vez establecida la configuración del módulo se pasará a ejecutar el mismo, obteniendo las prestaciones de los datos procesados y generando un archivo «sol.MIF» que permitirá la visualización de dichas prestaciones al ejecutar el tercer y último módulo.

9.4.3. Módulo MFileRunner

Finalmente, el módulo MFileRunner permite visualizar todo tipo de resultados que proporcionan los datos tratados con los módulos anteriores. De este modo, al emplearlo se permitirá visualizar valores de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, entre otras opciones. La interfaz de este módulo es bastante sencilla, tal y como se aprecia en la Figura 26.

Únicamente se deberá seleccionar los ficheros u opciones que se quieran consultar y definir el input de datos para su representación, que es el archivo sol.MIF generado en el módulo anterior. Se empleará este módulo con las opciones de *Analyze Position* y *SBAS Accuracy*, proporcionando de este modo los valores del HNSE y VNSE, así como diagramas de integridad y el gráfico de Stanford correspondiente para cada caso.

Se ha intentado procesar resultados de continuidad y disponibilidad sin éxito, por lo que el análisis de estas prestaciones se realizará mediante la consulta en el servicio EDAS de EGNOS de los mapas disponibles para cada uno de los días de estudio. En el capítulo 10 se explicará de manera más detalladas los procedimientos seguidos para obtener dichos resultados.

Finalmente cabe mencionar que todo el procedimiento seguido con el software en cada uno de los módulos se deberá hacer 5 veces, de manera que se obtengan los datos de cada uno de los días de estudio para la validación de la campaña sobre el terreno.

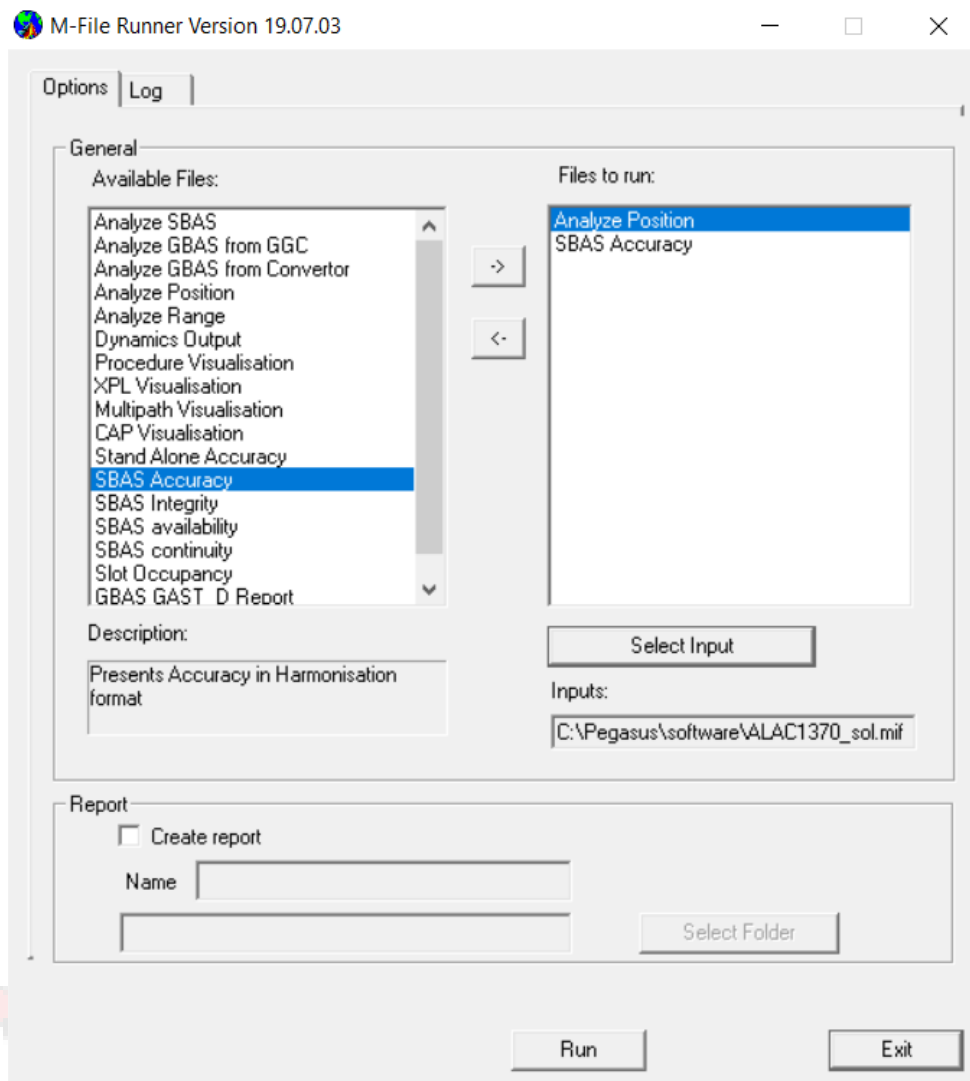


Figura 26: Interfaz del módulo MFileRunner

10. Obtención de resultados. Campaña sobre el terreno

10.1. Análisis de Precisión

La precisión se mide mediante los errores de posición en la navegación a nivel vertical y horizontal. En esta sección se muestran los resultados obtenidos para cada día de estudio. De acuerdo con el SoL de EGNOS, los requerimientos de precisión para operar mediante LPV-200 presentan los siguientes valores máximos en el error de posición:

- **HNSE:** 3 m.
- **VNSE:** 4 m.

10.1.1. Día 14/05/2020

Los resultados de las prestaciones proporcionadas por EGNOS para el 14 de mayo en el área del aeropuerto de Alicante se muestran en la Figura 27. El valor del HNSE medio obtenido para LPV-200 es de 1.04325 m, mientras que el del VNSE es de 3.4545 m. Ambos parámetros cumplen perfectamente los requerimientos impuestos por lo que se puede afirmar que la operabilidad en cuanto a lo que precisión se refiere es correcta para dicho día.

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>LPV200</service></code>	<code><service>LPV200</service></code>
<code><samples>86039</samples></code>	<code><samples>86039</samples></code>
<code><mean>1.04325</mean></code>	<code><mean>3.4545</mean></code>
<code><rms>1.06749</rms></code>	<code><rms>3.49534</rms></code>

Figura 27: Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 14/05/2020

10.1.2. Día 15/05/2020

Los resultados de las prestaciones proporcionadas por EGNOS para el 15 de mayo en el área del aeropuerto de Alicante se muestran en la Figura 28. El valor del HNSE medio obtenido para LPV-200 es de 1.03425 m, mientras que el del VNSE es de 3.48323 m. Ambos parámetros cumplen perfectamente los requerimientos impuestos por lo que se puede afirmar que la operabilidad en cuanto a lo que precisión se refiere es correcta para dicho día.

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>LPV200</service></code>	<code><service>LPV200</service></code>
<code><samples>85134</samples></code>	<code><samples>85134</samples></code>
<code><mean>1.03425</mean></code>	<code><mean>3.48323</mean></code>
<code><rms>1.05943</rms></code>	<code><rms>3.51737</rms></code>

Figura 28: Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 15/05/2020

10.1.3. Día 16/05/2020

Los resultados de las prestaciones proporcionadas por EGNOS para el 16 de mayo en el área del aeropuerto de Alicante se muestran en la Figura 29. El valor del HNSE medio obtenido para LPV-200 es de 1.01819 m, mientras que el del VNSE es de 3.37167 m. Ambos parámetros cumplen perfectamente los requerimientos impuestos por lo que se puede afirmar que la operabilidad en cuanto a lo que precisión se refiere es correcta para dicho día.

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>LPV200</service></code>	<code><service>LPV200</service></code>
<code><samples>86039</samples></code>	<code><samples>86039</samples></code>
<code><mean>1.01819</mean></code>	<code><mean>3.37167</mean></code>
<code><rms>1.03983</rms></code>	<code><rms>3.40195</rms></code>

Figura 29: Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 16/05/2020

10.1.4. Día 17/05/2020

Los resultados de las prestaciones proporcionadas por EGNOS para el 17 de mayo en el área del aeropuerto de Alicante se muestran en la Figura 30. El valor del HNSE medio obtenido para LPV-200 es de 0.996967 m, mientras que el del VNSE es de 3.59975 m. Ambos parámetros cumplen perfectamente los requerimientos impuestos por lo que se puede afirmar que la operabilidad en cuanto a lo que precisión se refiere es correcta para dicho día.

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>LPV200</service></code>	<code><service>VAL 40m</service></code>
<code><samples>86040</samples></code>	<code><samples>86040</samples></code>
<code><mean>0.996967</mean></code>	<code><mean>3.59975</mean></code>
<code><rms>1.01925</rms></code>	<code><rms>3.63463</rms></code>

Figura 30: Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 17/05/2020

10.1.5. Día 18/05/2020

Los resultados de las prestaciones proporcionadas por EGNOS para el 18 de mayo en el área del aeropuerto de Alicante se muestran en la Figura 31. El valor del HNSE medio obtenido para LPV-200 es de 0.986985 m, mientras que el del VNSE es de 3.42783 m. Ambos parámetros cumplen perfectamente los requerimientos impuestos por lo que se puede afirmar que la operabilidad en cuanto a lo que precisión se refiere es correcta para dicho día.

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>LPV200</service></code>	<code><service>LPV200</service></code>
<code><samples>84983</samples></code>	<code><samples>84983</samples></code>
<code><mean>0.986985</mean></code>	<code><mean>3.42783</mean></code>
<code><rms>1.0086</rms></code>	<code><rms>3.46115</rms></code>

Figura 31: Resultados de precisión: HNSE y VNSE. 18/05/2020

Tras haber analizado individualmente las prestaciones de precisión, se puede afirmar que el servicio proporcionado es válido para realizar procedimientos de aproximación LPV-200.

10.2. Análisis de Integridad

Para poder reflejar la integridad del sistema durante los días de estudio se ha obtenido mediante pegasus un conjunto de histogramas que reflejan los valores del HSI y el VSI, junto con los diagramas de Stanford correspondientes horizontales y verticales. También se ha obtenido individualmente los histogramas del HPE y VPE, sin embargo se ha considerado mostrar estos valores en los diagramas de stanford, ya que para medir la integridad se compara en todo momento el nivel de protección con el error de posición, tanto en la dirección vertical como en la horizontal. En las siguientes secciones se encuentran recogidos los resultados obtenidos con pegasus para cada día (Figura 32-Figura 51):

10.2.1. Día 14/05/2020

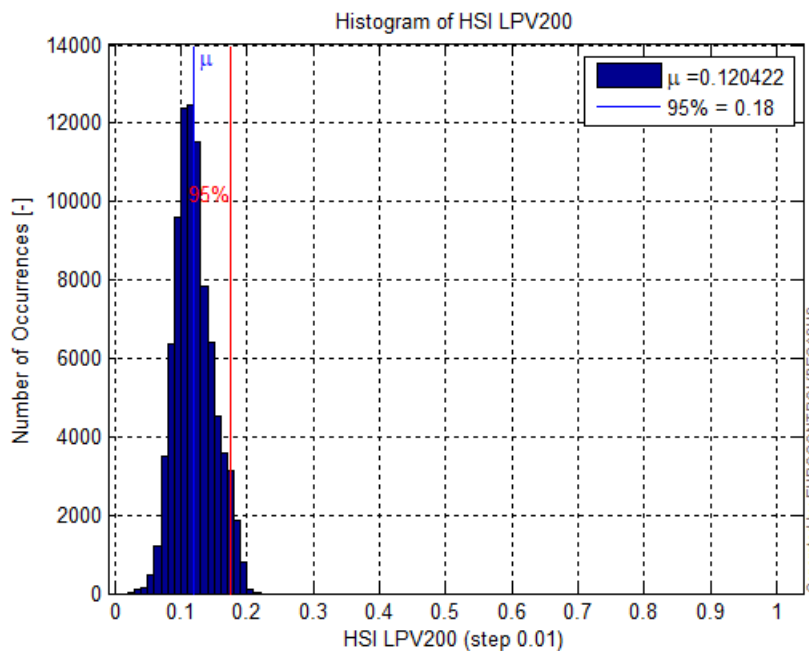


Figura 32: Histograma del HSI para el día 14/05/2020

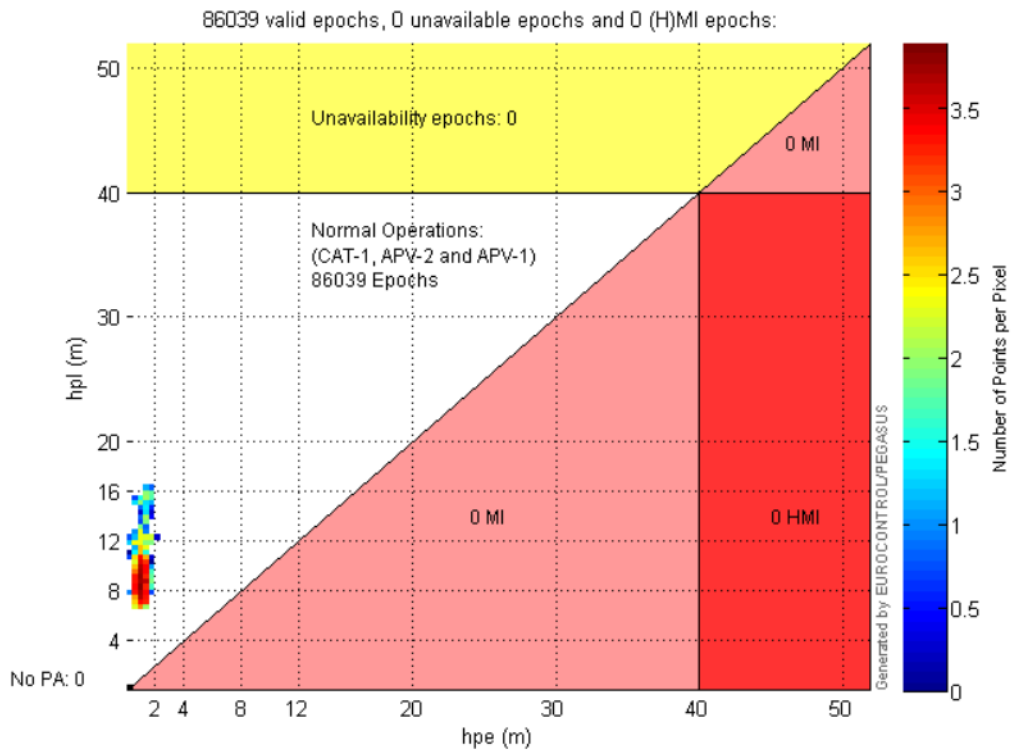


Figura 33: Diagrama de Stanford Horizontal para el día 14/05/2020

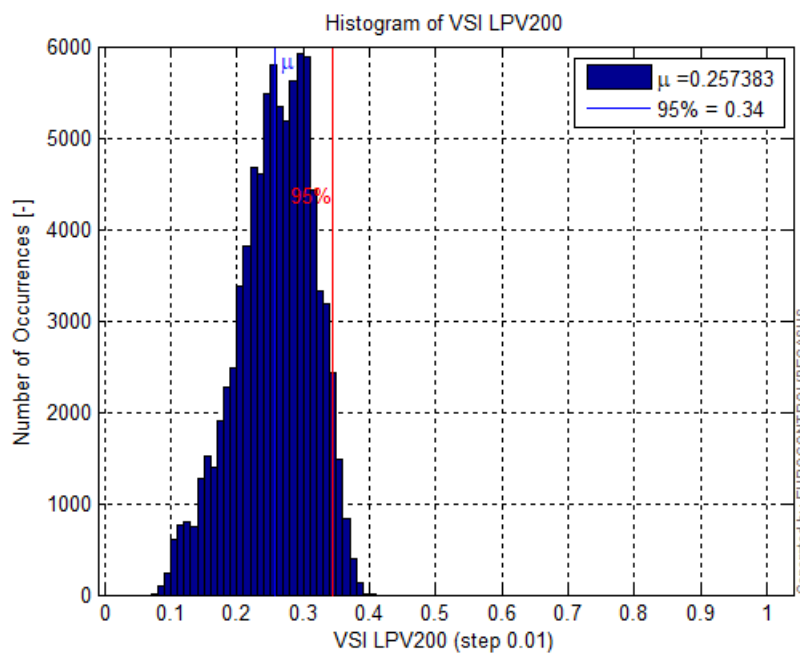


Figura 34: Histograma del VSI para el día 14/05/2020

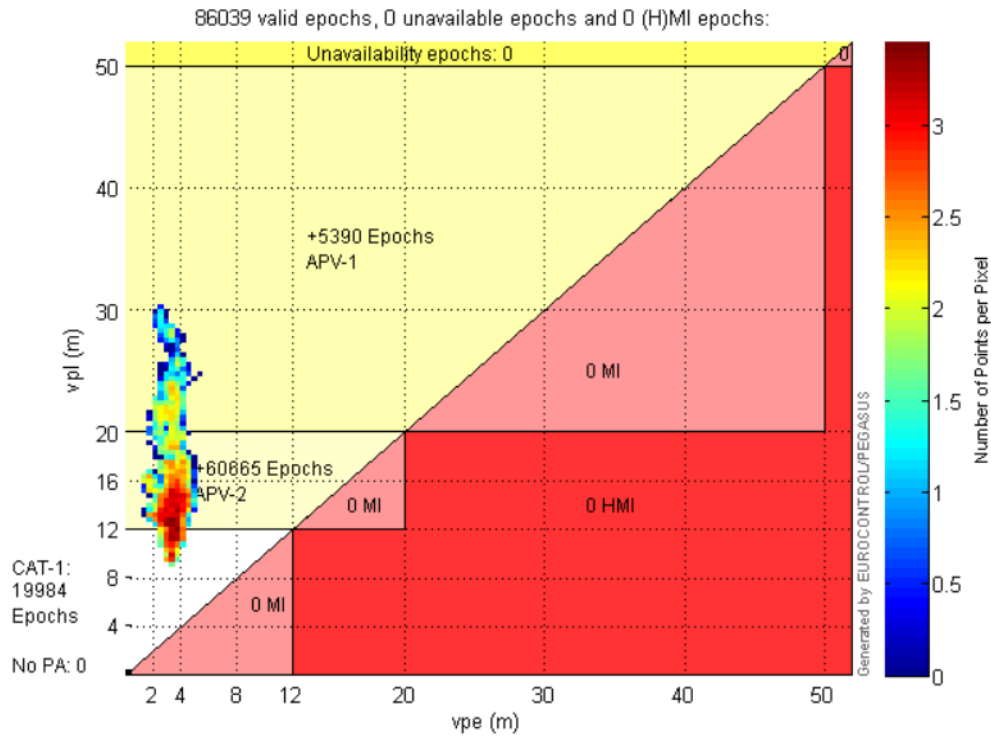


Figura 35: Diagrama de Stanford Vertical para el día 14/05/2020

10.2.2. Día 15/05/2020

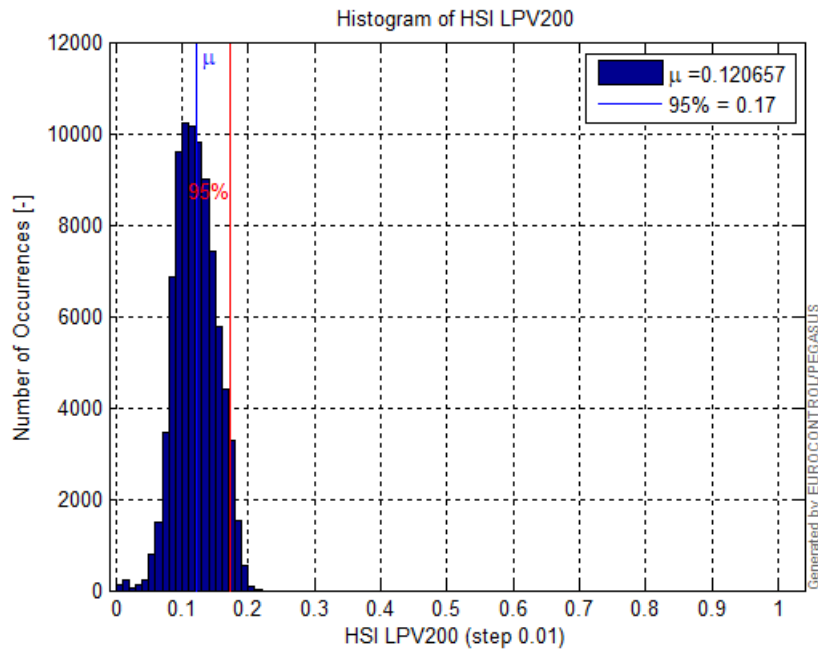


Figura 36: Histograma del HSI para el día 15/05/2020

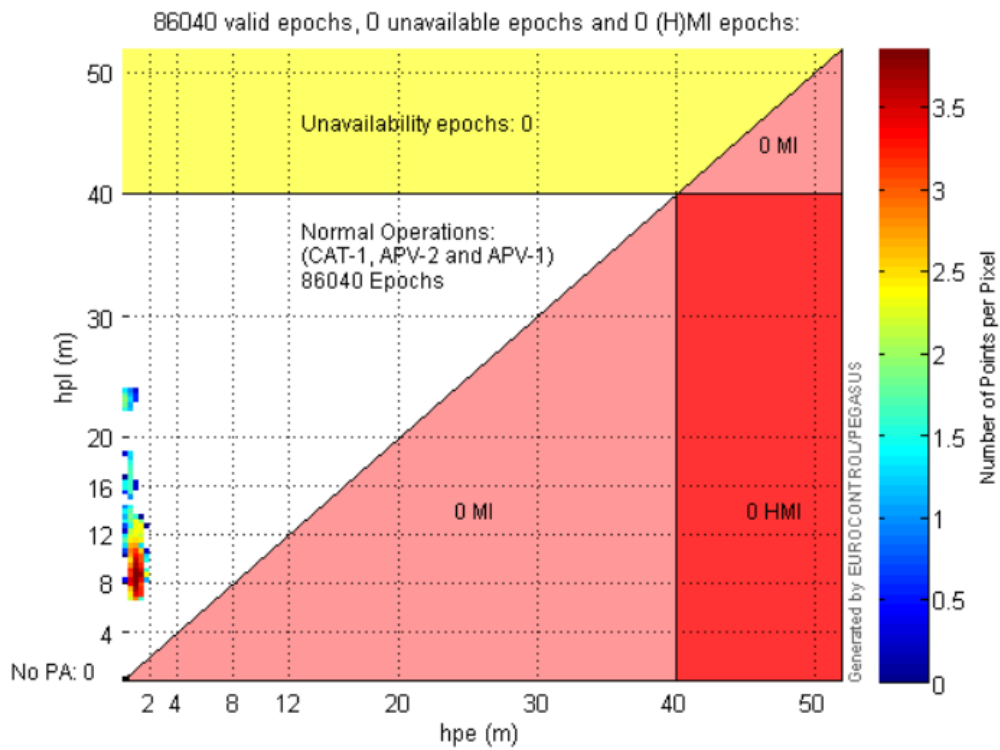


Figura 37: Diagrama de Stanford Horizontal para el día 15/05/2020

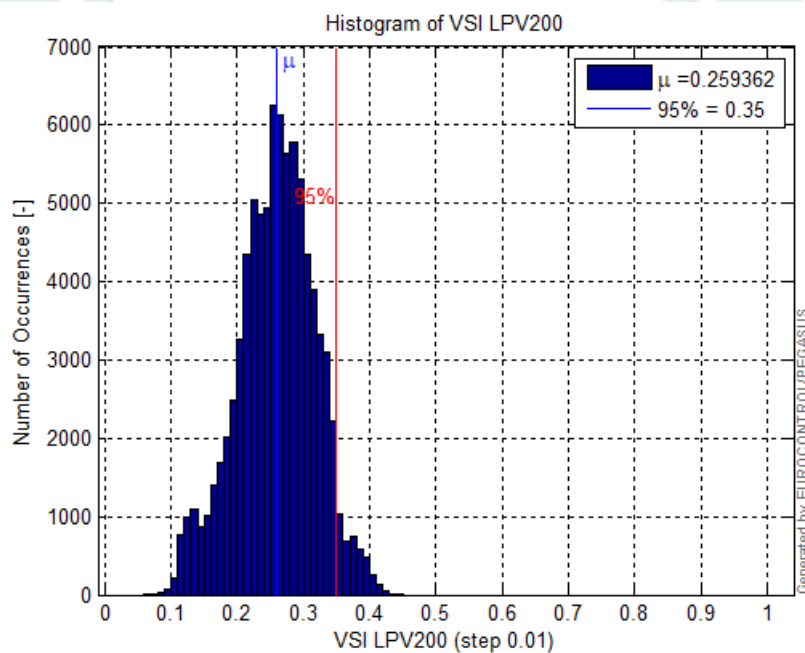


Figura 38: Histograma del VSI para el día 15/05/2020

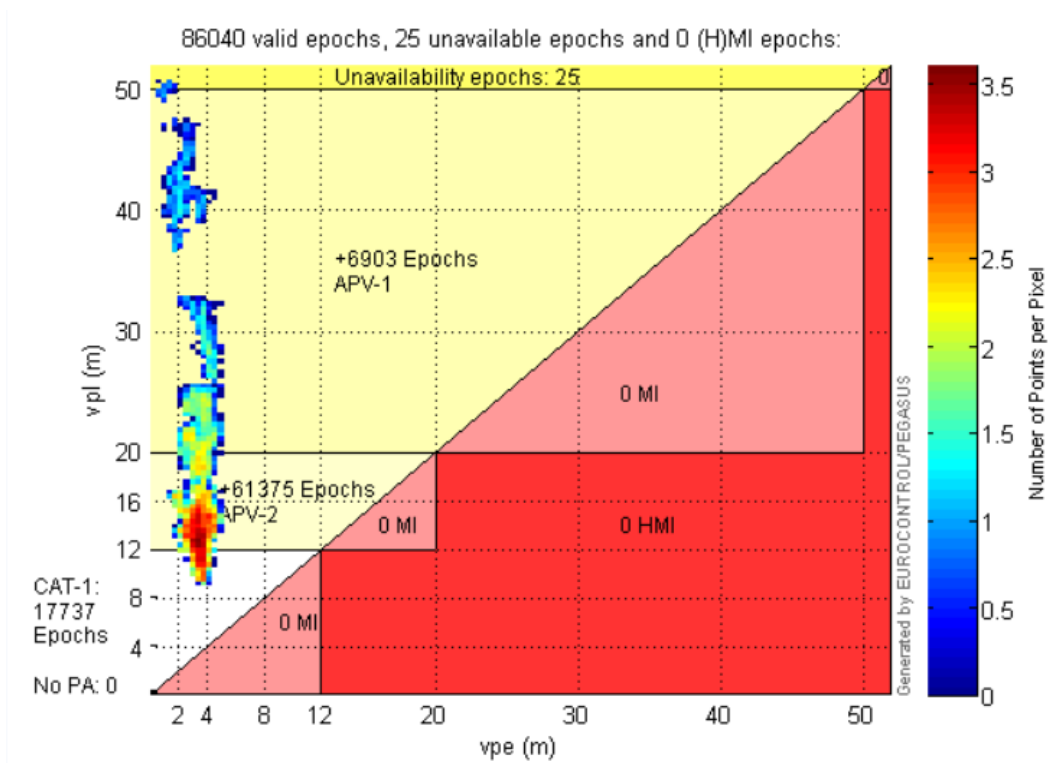


Figura 39: Diagrama de Stanford Vertical para el día 15/05/2020

10.2.3. Día 16/05/2020

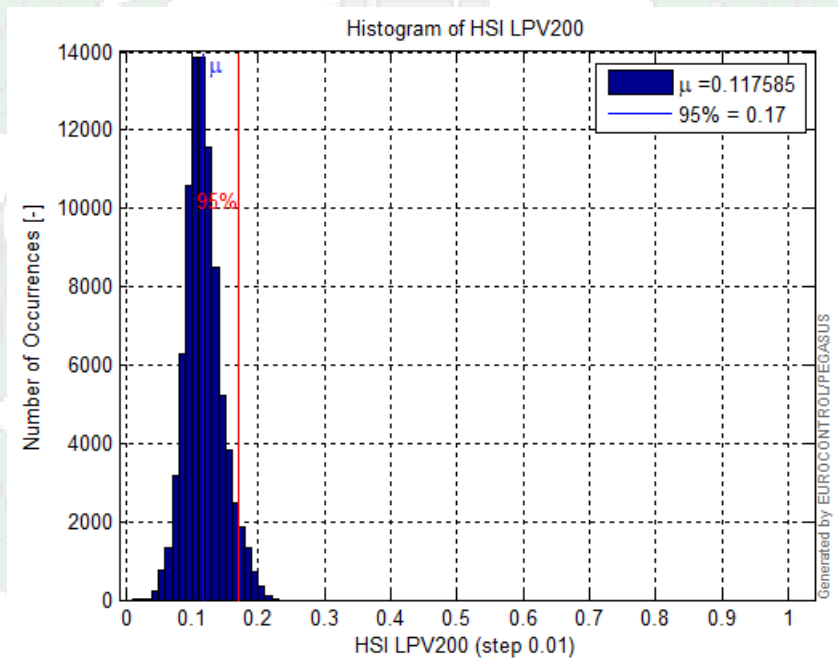


Figura 40: Histograma del HSI para el día 16/05/2020

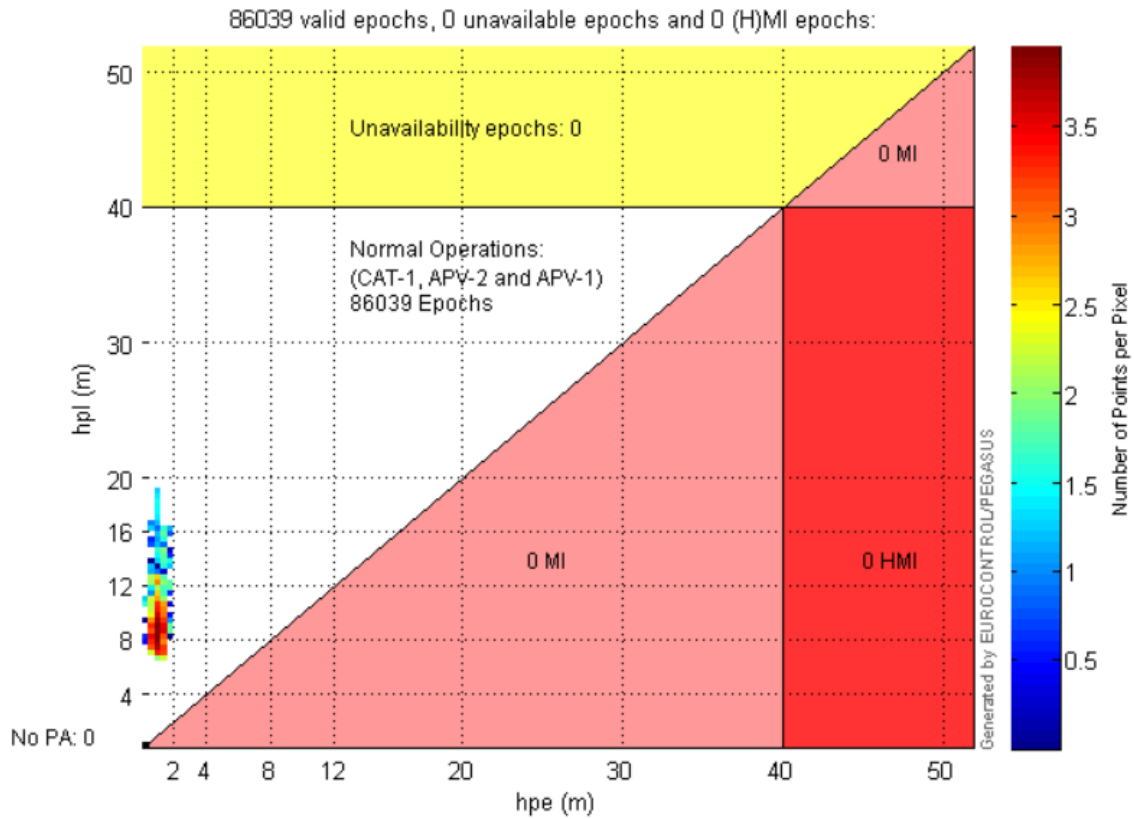


Figura 41: Diagrama de Stanford Horizontal para el día 16/05/2020

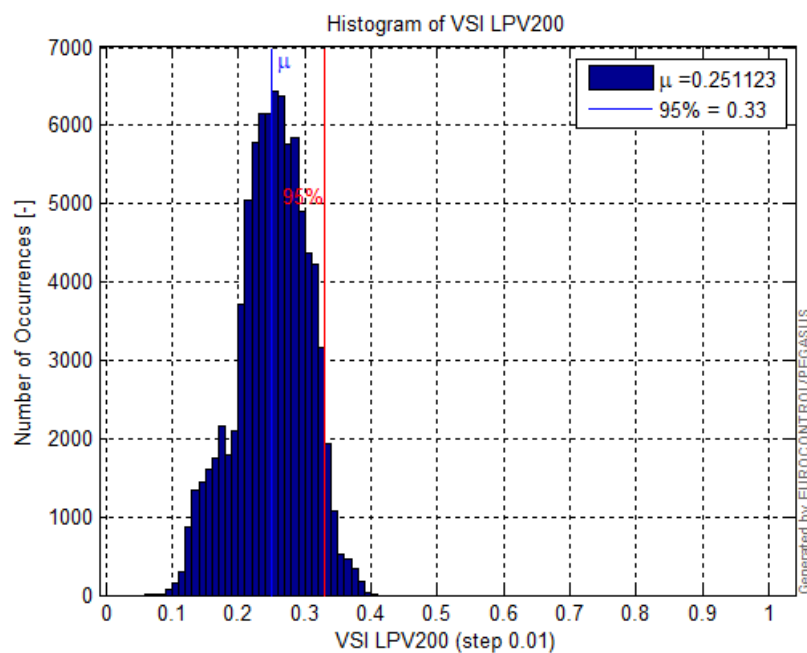


Figura 42: Histograma del VSI para el día 16/05/2020

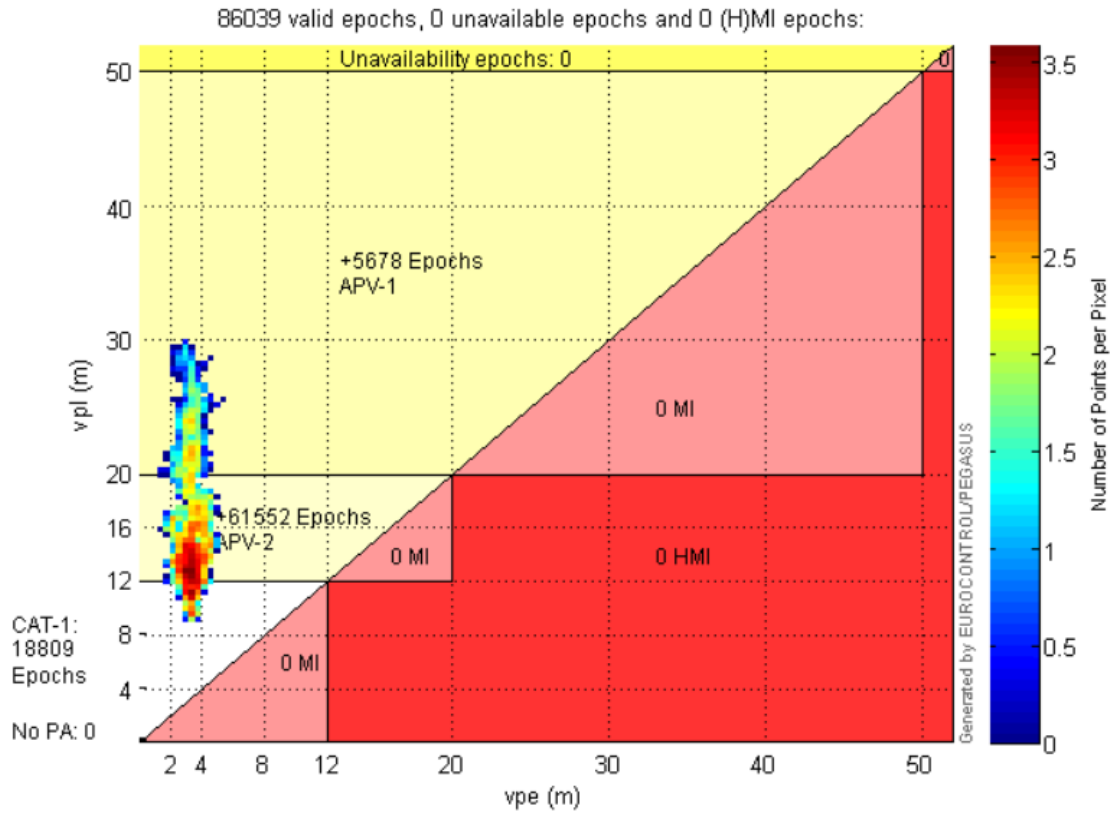


Figura 43: Diagrama de Stanford Vertical para el día 16/05/2020

10.2.4. Día 17/05/2020

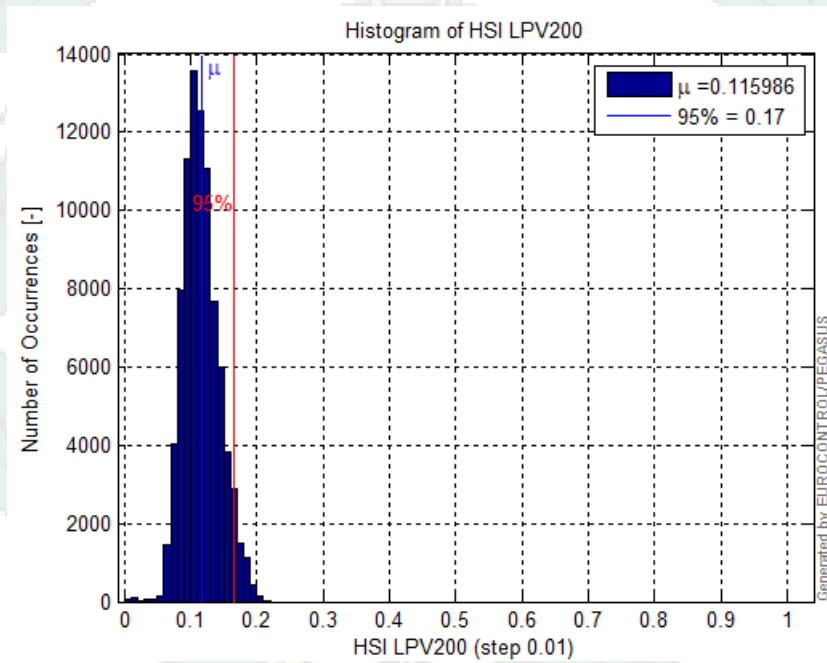


Figura 44: Histograma del HSI para el día 17/05/2020

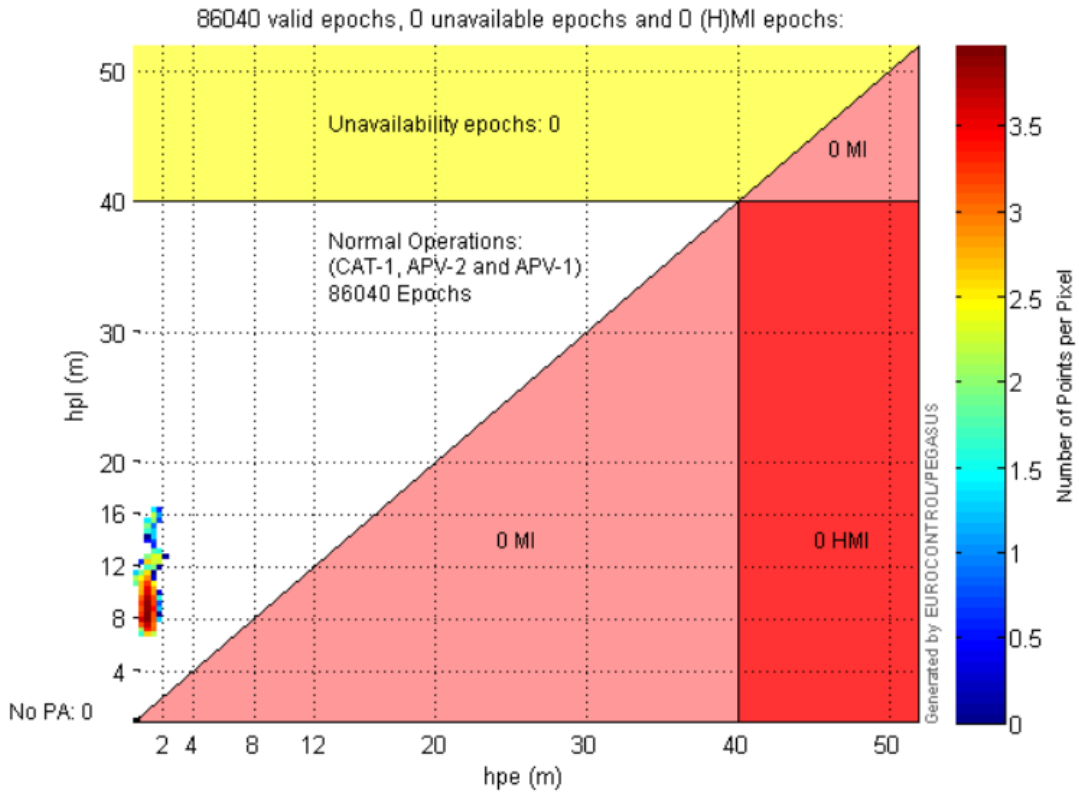


Figura 45: Diagrama de Stanford Horizontal para el día 17/05/2020

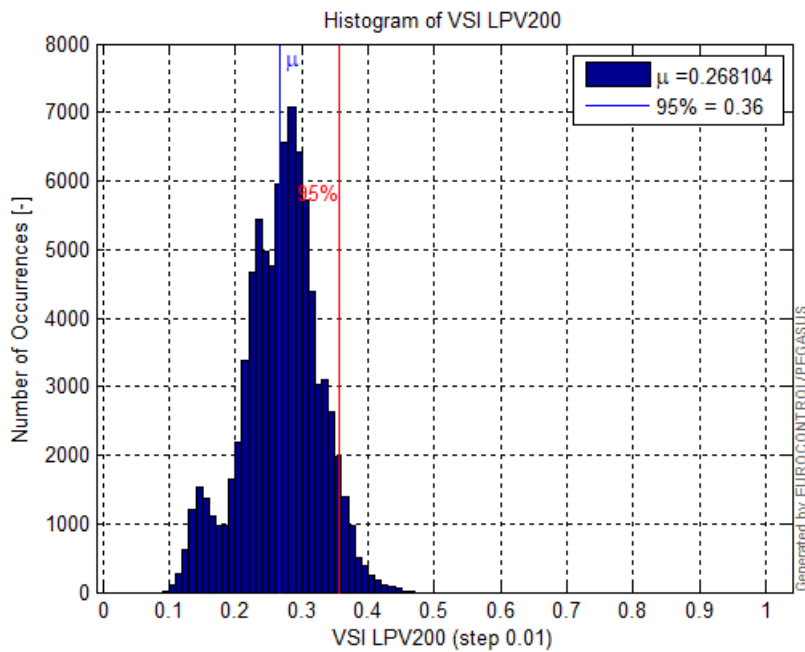


Figura 46: Histograma del VSI para el día 17/05/2020

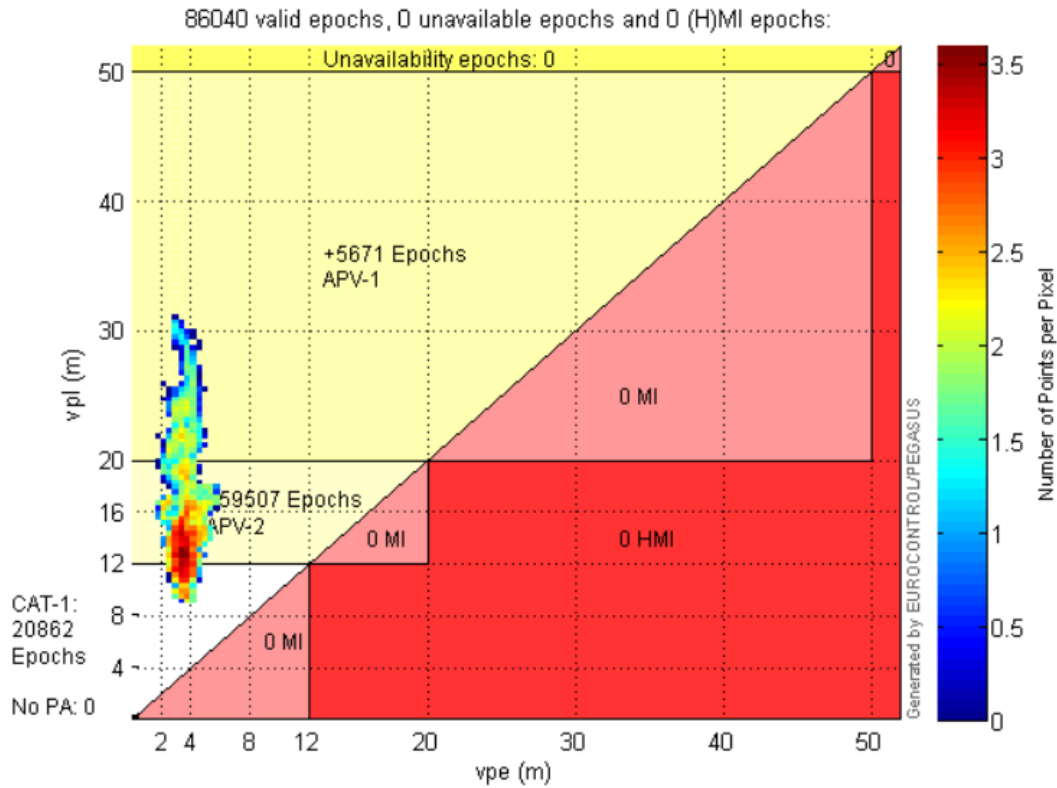


Figura 47: Diagrama de Stanford Vertical para el día 17/05/2020

10.2.5. Día 18/05/2020

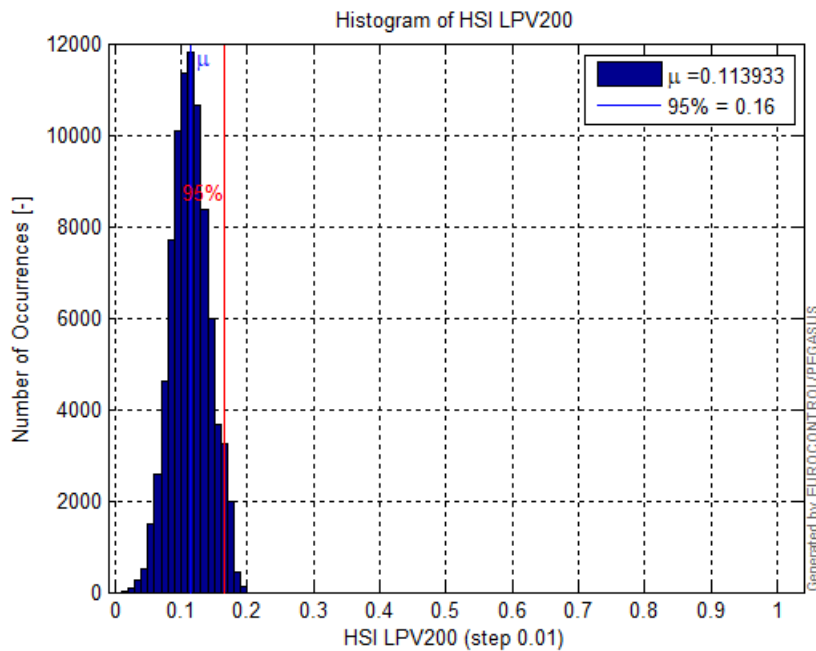


Figura 48: Histograma del HSI para el día 18/05/2020

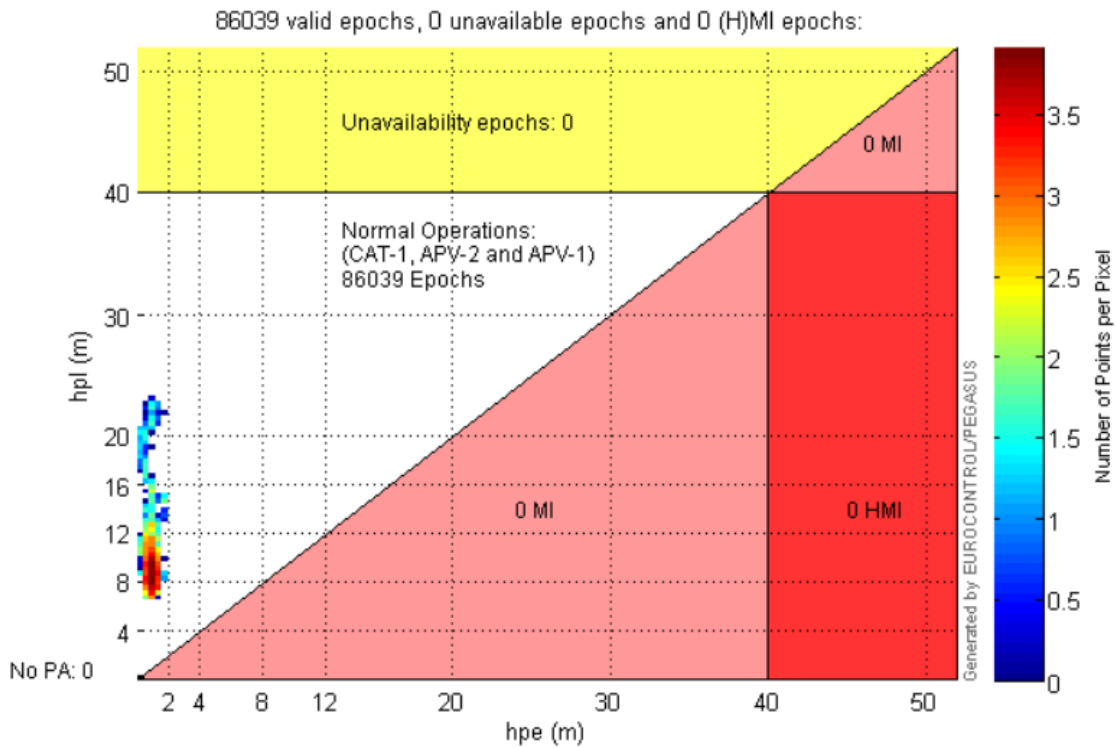


Figura 49: Diagrama de Stanford Horizontal para el día 18/05/2020

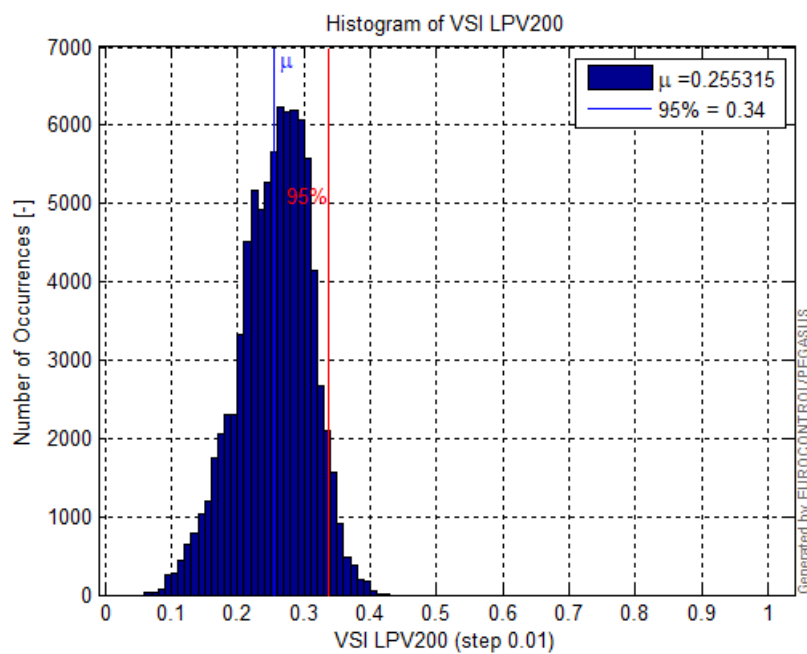


Figura 50: Histograma del VSI para el día 18/05/2020

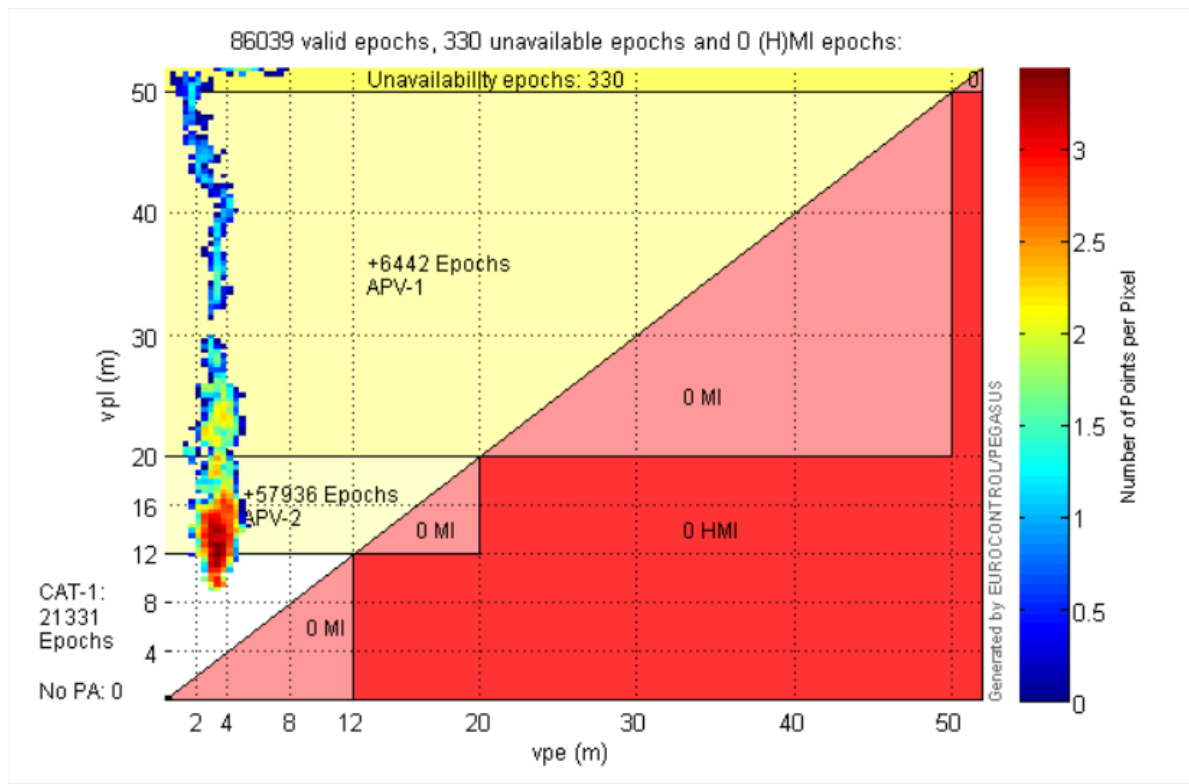


Figura 51: Diagrama de Stanford Vertical para el día 18/05/2020

En primer lugar, para cada uno de los días los valores de los historamas de índices de seguridad son bastante buenos, ya que distan de llegar a la unidad, garantizando por tanto un sistema íntegro. Del mismo modo pasa en los diagramas de stanford, generalmente las medidas se ubican en la región nominal descrita en el capítulo 7, por lo que se puede decir que se puede operar con el sistema para LPV-200.

Sin embargo, en el día 15 y en el día 18 de mayo se han detectado resultados fuera del área nominal, tal como se aprecia en los diagramas de stanford verticales respectivos a cada día (Figuras 39 y 51). En el caso del día 15 el sistema se encuentra no disponible durante un breve período de tiempo, razón por la cual se perdería la integridad del mismo. De manera similar pero con una relevancia mayor, el día 18 hay un gran número de medidas que se hayan fuera de los límites de disponibilidad por lo que para esos dos casos puntuales el sistema no se podría emplear para LPV-200. Estos fallos, no obstante, se deben principalmente a un error en la disponibilidad, por lo que se tratará de explicar en la siguiente sección lo ocurrido y como se puede interpretar y solucionar.

10.3. Análisis de Disponibilidad

Ya se ha mencionado que la disponibilidad hace referencia a dos conceptos, la disponibilidad de la señal en el espacio (SIS) y la disponibilidad del propio sistema para proporcionar el servicio para el que está destinado.

En primer lugar, dado que Pegasus no ha sido capaz de procesar los datos y genera unos resultados de disponibilidad, se explicará el procedimiento seguido para verificar esta prestación para LPV-200. La disponibilidad de señal se ha calculado de manera sencilla siguiendo las recomendaciones del equipo de validación GNSS de ENAIRE.

Las mediciones diarias se han tomado cada segundo. Dado que el día tiene 86400 segundos la disponibilidad SIS se obtendrá a partir de la división del número de muestras medidas de cada día entre el total de segundos del mismo. de este modo se recogen los resultados para los 5 días de estudio en la Figura 52.

Disponibilidad SIS LPV-200					
Mes de análisis	14/05/2020	15/05/2020	16/05/2020	17/05/2020	18/05/2020
Mensajes válidos	86039	85134	86039	86040	84983
Mensajes totales	86400	86400	86400	86400	86400
Disponibilidad SIS (%)	99,582	98,535	99,582	99,583	98,360

Figura 52: Cálculos de disponibilidad SIS. Campaña Sobre el terreno

Los resultados de disponibilidad SIS son los esperados, puesto que para los días 14, 16 y 17 ofrecen unas prestaciones bastante superiores al 99 %, mientras que en los días 15 y 18 no cumplen con el mínimo, hecho que ya se había detectado en el análisis de integridad. Además cabe mencionar que la disponibilidad total será todavía más elevada ya que en este caso solo se ha analizado el PRN136, que es el que se ha empleado para la toma de datos. Un análisis combinado daría lugar a una disponibilidad mayor del 99.9 % en los casos sin anomalías.

Por su parte, el estudio de la disponibilidad del sistema se ha realizado mediante la consulta en el servicio EDAS de EGNOS, en el que se ha procedido a analizar los mapas generados por EGNOS para cada uno de los días. De manera análoga EGNOS proporciona mapas para ambos satélites PRN 123 y 136, y un tercero para la combinación de los mismos. El mapa combinado, un ejemplo del cual se muestra en la Figura 53, es el que se ha empleado para la toma de datos. En él se puede observar como normalmente la mayoría de la zona ECAC queda cubierta con una disponibilidad mayor al 99.9 %.

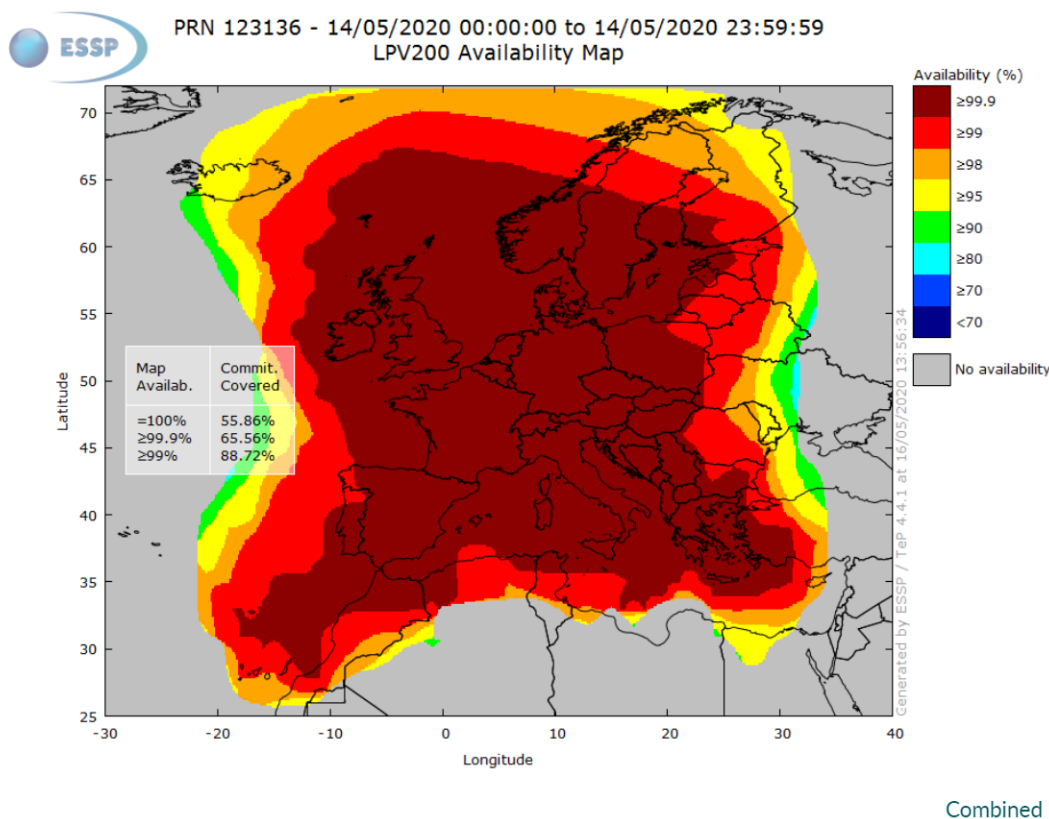


Figura 53: Disponibilidad de servicio LPV-200 para el 14/05/2020 [1]

En la zona de Alicante, las prestaciones obtenidas son las mostradas en la Figura 54.

Disponibilidad LPV-200 (%)					
Mes de análisis	14/05/2020	15/05/2020	16/05/2020	17/05/2020	18/05/2020
Datos de EGNOS	>99,9	>98	>99,9	>99,9	>98

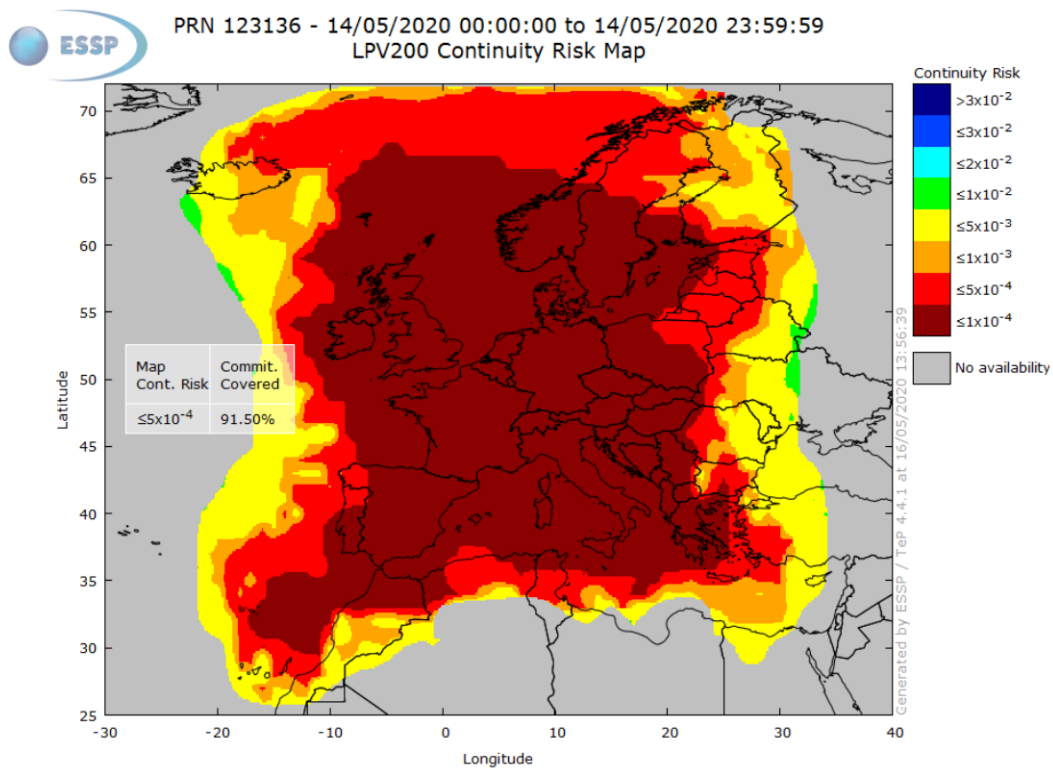
Figura 54: Disponibilidad de servicio LPV-200. Campaña Sobre el terreno

Corroborando los datos calculados de disponibilidad SIS, se observa como en los días 15 y 18 de mayo la disponibilidad mínima garantizada es del 98 %, incumpliendo por tanto con los requerimientos del SoL de EGNOS.

Ante este escenario de error, se ha decidido consultar con EGNOS y ENAIRE los motivos del fallo de rendimiento puntual en esos dos días. El equipo de EGNOS confirmó que efectivamente había valores de disponibilidad peores a los que usualmente se dan en el área de Alicante. Este hecho se debía a que actualmente hay dos satélites GPS que no se están utilizando para el cálculo de correcciones, lo cual ha dado lugar a una degradación de las prestaciones en algunas áreas de la zona de cobertura de EGNOS. Sin embargo, el equipo afirmó que el problema en cuestión ya se está solucionando y además garantizó que entorno al comienzo del mes de julio de 2020 ya se volvería a alcanzar una disponibilidad cercana al 100 % para el área de Alicante.

10.4. Análisis de Continuidad

Finalmente, la continuidad se analizó del mismo modo que la disponibilidad de servicio, a través del portal EDAS de EGNOS, accediendo a los mapas diarios de continuidad para LPV200. En la Figura 55 se adjunta un ejemplo de mapa de continuidad LPV-200 para el día 14 de mayo.



Combined

Figura 55: Continuidad LPV-200 para el 14/05/2020 [1].

La información acerca del índice de riesgo de continuidad para cada día queda recogida en la Figura 56.

Riesgo de Continuidad LPV-200					
Mes de análisis	14/05/2020	15/05/2020	16/05/2020	17/05/2020	18/05/2020
Datos de EGNOS	<0,0001	<0,0005	<0,0001	<0,0001	<0,001

Figura 56: Continuidad para LPV-200. Campaña Sobre el terreno

En este caso se aprecia como para los 4 primeros días los valores mínimos de riesgo de continuidad varían entre 0.0001 y 0.0005, lo cual indica que los requerimientos del SoL de EGNOS se cumplen. No obstante, el día 18 de mayo se ha obtenido un valor de 0.001, bastante alto en comparación a los mínimos.

Para tratar con este inconveniente se consultó a ENAIRE, quien explicó que como los índices de continuidad se miden en función del número de interrupciones que pueden ocurrir, las cuales se considera que tienen una duración de 15 segundos, es perfectamente normal que al producirse uno o dos cortes ya se supere estos índices. Sin embargo, al suceder esto en días puntuales se establece que estos fallos se pueden «amortiguar» por el resto de días en los que no ha habido interrupciones, de manera que es perfectamente normal que los valores de continuidad no se cumplan en este tipo de casos.

Además, es lógico que para el día 18, en el cual ha habido problemas de disponibilidad por la falta de satélites, se haya producido un evento de discontinuidad más grande de lo esperado. Sin embargo, como ya se ha mencionado, este hecho no sería determinante y se puede afirmar que la validación para LPV-200 se podría realizar mitigando estos problemas una vez se haya solucionado la incidencia de los satélites GPS que ha comentado EGNOS.



11. Conclusiones

En este último capítulo se recogen los análisis, comentarios, resultados y valoraciones conseguidas tras la realización del Trabajo de Fin de Grado, abarcando tanto el desarrollo del procedimiento de validación como la redacción profesional del presente documento.

En primer lugar, se ha planteado un estudio teórico inicial de manera que se puedan introducir los diferentes conceptos teóricos y prácticos así como los organismos y procedimientos a seguir para realizar este tipo de validaciones en el campo de la navegación aérea. El objetivo en todo momento ha sido evolucionar desde una perspectiva enfocada en un aeropuerto en el que se requiere un sistema de aproximación eficaz y lo más económico posible. Se ha partido de la mención del sistema tradicional (ILS) para introducir la descripción de las constelaciones GNSS como punto de partida para emplear la navegación por satélite en la aviación. Seguidamente se ha expresado que al ser insuficientes las prestaciones ofrecidas por dichos satélites se requería de unos sistemas que permitiesen tratar esta información de manera más precisa y con mejor rendimiento.

De este modo se consolida la posibilidad de emplear el concepto GNSS como un método efectivo para la navegación aérea, a través de una definición de especificaciones y requerimientos que se deben cumplir para alcanzar la meta, que en este caso es la operabilidad mediante LPV-200. Así, se ha definido el sistema de aumentación Europeo EGNOS junto con sus servicios, los cuales se han seguido en la realización del proyecto.

Una vez expuestos los elementos necesarios para la comprensión y contextualización de las labores a realizar, se procedió a realizar la validación, concretamente la primera y segunda etapa de la misma. Se consideró que el empleo de la estación ERGNSS de Alicante sería un buen acercamiento a la realidad del propio aeropuerto, por lo que sus datos fueron los empleados en todo el proyecto.

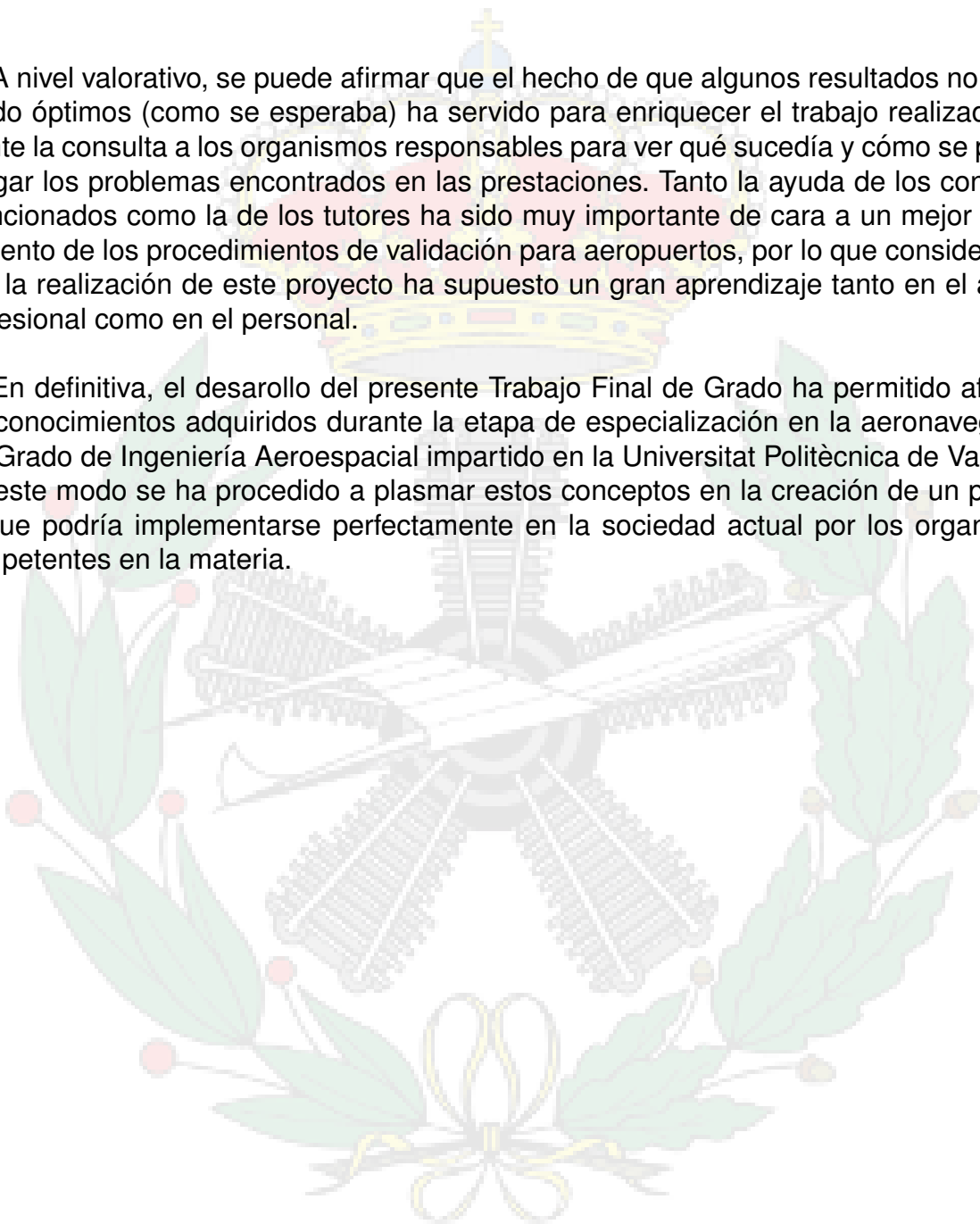
La validación a largo plazo supuso un breve análisis que demuestra que las prestaciones en el área de estudio, a niveles generales, son las indicadas para operar mediante LPV-200, de acuerdo con el SoL de EGNOS. Una vez clara esta premisa, se procedió al tratamiento de datos para la campaña sobre el terreno, en la que de manera más concreta se han podido reflejar las características del sistema de aumentación en Alicante. Para poder realizar esta fase de validación se solicitó ayuda a Eurocontrol, ENAIRE y EGNOS. Todas las organizaciones fueron de gran ayuda tanto en consultas de acceso y tratamiento e interpretación de datos, como en el soporte técnico necesitado para lidiar con los problemas que dio el software de Pegasus, o el acceso a servidores FTP.

Sin duda el trabajo con software supuso el mayor reto para el proyecto, pues todas las herramientas empleadas eran desconocidas al inicio del mismo, por lo que fue necesario aprender siguiendo tutoriales así como solicitando la ya mencionada ayuda. Concretamente, fue gracias al contacto en eurocontrol que se pudieron procesar todos los datos de manera rápida mediante Pegasus para poder proceder a su posterior análisis. Del mismo modo, la interpretación de las prestaciones y demás dudas técnicas fueron solventadas por el equipo de validación GNSS de ENAIRE, de manera profesional y efectiva.

Durante la realización de la validación y la consiguiente obtención de resultados, se detectó que la elaboración de estos procedimientos es rigurosa y estricta, pero no supone una ciencia exacta, ya que hemos observado de primera mano como ocasionalmente se debe lidiar con problemas e inconvenientes de la mejor manera posible, tratando de mitigarlos al máximo en el caso de no poder erradicarlos. Este hecho se ve claramente en los resultados de disponibilidad para dos días concretos, los cuales se debían a una incidencia temporal con dos satélites GPS que no estaban siendo usados para el cálculo de correcciones. En esta situación claramente no se estaban cumpliendo con las especificaciones del SoL, sin embargo es necesario investigar el motivo y tras ello sacar conclusiones para poder determinar si se puede validar o no el procedimiento en cuestión.

A nivel valorativo, se puede afirmar que el hecho de que algunos resultados no hayan salido óptimos (como se esperaba) ha servido para enriquecer el trabajo realizado mediante la consulta a los organismos responsables para ver qué sucedía y cómo se podían mitigar los problemas encontrados en las prestaciones. Tanto la ayuda de los contactos mencionados como la de los tutores ha sido muy importante de cara a un mejor entendimiento de los procedimientos de validación para aeropuertos, por lo que consideramos que la realización de este proyecto ha supuesto un gran aprendizaje tanto en el ámbito profesional como en el personal.

En definitiva, el desarrollo del presente Trabajo Final de Grado ha permitido afianzar los conocimientos adquiridos durante la etapa de especialización en la aeronavegación del Grado de Ingeniería Aeroespacial impartido en la Universitat Politècnica de València. De este modo se ha procedido a plasmar estos conceptos en la creación de un proyecto que podría implementarse perfectamente en la sociedad actual por los organismos competentes en la materia.





12. Pliego de condiciones. Introducción

El pliego de condiciones reúne todos aquellos aspectos y requisitos a considerar para que el desarrollo del proyecto expresado en la memoria se realice de forma segura, en términos de diseño, entorno de trabajo, etc. En él se detallan especificaciones técnicas como regulaciones y factores de trabajo a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

13. Condiciones Generales

Las condiciones generales reúnen diferentes aspectos que aluden al entorno y estructura en el que se desarrolla el proyecto. El ingeniero que trabaje en el mismo deberá de atenerse a los artículos de El Real Decreto 488/1997, que establece una serie de disposiciones mínimas de salud y seguridad para reducir los problemas o situaciones de riesgo durante el transcurso de éste. Este hecho es de vital importancia ya que se considera el desarrollo del proyecto como un trabajo en el que se emplean pantallas de visualización, por lo que es necesario conocer el Decreto en cuestión con el objetivo de evitar lesiones y cualquier otro tipo de riesgo laboral que derive de un mal uso de dichas pantallas.

13.1. Supervisión

La realización del presente proyecto está supeditada a una supervisión por parte del profesor tutor responsable del mismo. El responsable en cuestión deberá tener amplios conocimientos y experiencia en el campo de la navegación aérea, dominando conceptos como PBN, sistemas de aumentación así como los procedimientos a seguir para una certificación de este tipo.

13.2. Conocimientos específicos

Del mismo modo, el ingeniero ejecutor del proyecto deberá conocer diferentes conceptos de navegación y tener la capacidad de trabajar con diferentes tipos de software y documentación. Deberá ser capaz de procesar e interpretar los datos para obtener resultados y extraer conclusiones del mismo, determinando sin o no válidos y previendo posibles errores o malfuncionamientos que puedan ser mitigados empleando las regulaciones pertinentes.

14. Condiciones técnicas de material y equipamiento

14.1. Software

Se detalla la lista de software empleado en el proyecto, cuyas especificaciones y condiciones se podrán consultar en los manuales respectivos de cada uno de ellos.

- **Microsoft Office.** Paquete de ofimática empleado en la presentación de resultados numéricos mediante tablas.

- **LATEX.** Language de programación empleado en la redacción del documento de texto de esta memoria.
- **Adobe Acrobat Reader** Formato principal de documentación bibliográfica consultada para el proyecto.
- **Pegasus.** Software principal con el que se ha realizado la validación GNSS.
- **TEQC:** Herramienta de concatenación de ficheros.
- **HATANAKA.** Descompresor para obtener datos en formato RINEX.
- **MATLAB** Software auxiliar empleado para la generación de algunos resultados en forma de diagramas.

14.2. Hardware

El software descrito implica una serie de especificaciones a cumplir por el equipo informático a utilizar. De todos los mencionados, los requisitos de Pegasus se deben tener en cuenta especialmente:

- **Procesador Pentium (Intel) de 350 MHz**
- **Memoria RAM de 128 Mb**
- **1 Gb de memoria para almacenamiento de datos y resultados**

Estos requisitos, sin embargo, resultan insuficientes ya que para la obtención de resultados gráficos es necesario el software Matlab, que exige unos requerimientos mínimos más restrictivos en función de la versión que se utilice. Para este proyecto se ha empleado un ordenador personal modelo: *MSI GP62 6QF*, que cumple perfectamente con todos los requisitos hardware mencionados.

14.3. Conexión a Internet

El desarrollo del proyecto requiere de una conexión estable a internet, puesto que se debe trabajar en todo momento con el correo electrónico disponible para resolución de dudas por parte del tutor u otros organismos competentes. Además el propio desarrollo del mismo en plataforma LATEX implica que el presente documento se redacte en la nube, por lo que se deberá asegurar una conexión de ancho de banda estándar pero que garantice que no se dará pérdida de información o un rendimiento bajo de la misma.

14.4. Material adicional

En el proyecto se empleará material adicional para definir los conceptos necesarios para realizar la validación, como son el caso de documentos o escritos oficiales de EG-NOS, OACI, etc. Esta documentación se deberá referenciar correctamente para clarificar en todo momento qué pautas se están siguiendo en el procedimiento de validación.

15. Especificaciones de los sistemas de la Aeronave

Se deberá garantizar que, una vez realizada la validación para el aeropuerto en cuestión, los sistemas de las aeronaves que pretendan realizar la fase de aproximación mediante LPV-200 deberán estar equipadas con un sistema de abordaje con receptor de señal que esté operativo y revisado debidamente. Del mismo modo las aeronaves deberán contar siempre con la posibilidad de desconectar el sistema de navegación GNSS para poder realizar la aproximación mediante ILS en el caso de que se produjese un fallo grave en el mismo.





III PRESUPUESTO

16. Desglose de Presupuesto

Mediante el presente estudio de presupuesto se pretende reflejar el valor económico que supondría la realización del proyecto descrito en este documento por un ingeniero recién titulado, atendiendo a conceptos generales como los gastos en personal, equipamiento y emplazamiento. De este modo se realizará un breve informe con el desglose de costes.

Previamente al análisis de cada uno de los elementos a incluir en el presupuesto cabe mencionar que se estima una duración del proyecto de 12 semanas (3 meses), desde el planteamiento inicial hasta la ejecución del mismo.

16.1. Coste de equipamiento y software

En este subapartado se incluyen los equipos y licencias empleadas para el desarrollo del proyecto. Además se incluye únicamente el valor de dichos recursos durante el período de trabajo, que es de 3 meses. A pesar de que algunas licencias hayan sido proporcionadas por la Universitat Politècnica de València, se ha considerado el precio real de las mismas para el análisis de presupuesto. El desglose de costes de este área se puede observar en la tabla de la Figura 57.

Coste de Equipos y Software				
Recurso	Coste total (€)	Período total de Amortización (Meses)	Período amortizado en el proyecto (Meses)	Importe total (€)
Pórtatil MSI GP62 6QF	1100,00	72	3	45,83
Licencia Microsoft Office 365	69,00	12	3	17,25
Licencia Matlab	800,00	12	3	200,00
Licencia Pegasus	0,00	12	3	0,00
Licencia TEQC	0,00	12	3	0,00
Licencia WINS CP	0,00	12	3	0,00
Licencia HATANAKA	0,00	12	3	0,00
Subtotal Equipos y Software				263,08

Figura 57: Coste de Equipos y Software

16.2. Coste de Oficina y derivados

Para la realización del proyecto se debe considerar el espacio físico en el que se ha realizado. Se ha alquilado una oficina para trabajar, en este subapartado se encuentran los costes de alquiler de la misma junto con sus derivados, que incluyen facturas de la luz o el acceso a internet, entre otros. Los costes de este campo quedan expresados en la tabla de la Figura 58.

Coste de Oficina y derivados			
Recurso	Coste mensual (€)	Período amortizado en el proyecto (Meses)	Importe total (€)
Alquiler Oficina	225,00	3	675,00
Gastos varios (Luz, etc.)	50,00	3	150,00
Subtotal Oficina y derivados			825,00

Figura 58: Coste de Oficina y derivados

16.3. Costes de personal

Para elaborar un informe de los gastos en personal del proyecto se ha estimado un trabajo de 28 horas semanales por parte del ingeniero titulado. Además se ha agregado la labor del profesor tutor, responsable del proyecto con una participación de 20 horas totales. De acuerdo a estas premisas se ha pasado a evaluar el sueldo horario de cada uno de los integrantes con respecto a las medias establecidas en España. así, se obtiene el resumen de costes de personal en la Figura 59.

Coste de Personal			
Recurso	Coste horario (€/h)	Horas empleadas	Importe total (€)
Ingeniero Titulado	12,00	336	4032,00
Prof. Ingeniero Doctor	25,00	20	500,00
Subtotal Personal			4532,00

Figura 59: Coste de Personal

17. Presupuesto Total del Proyecto

Tras analizar los 3 subapartados anteriores se obtiene el total sin IVA del proyecto, al cual se le debe aplicar el 21 % de IVA que establece la normativa en España. De este modo en la Figura 60 se expresa el Presupuesto final del Proyecto.

Presupuesto del Proyecto	
Concepto	Subtotal (€)
Equipos y software	263,08
Personal	4532,00
Oficina y derivados	825,00
Total sin IVA	5620,08
IVA (21%)	1180,22
TOTAL PROYECTO	6800,30

Figura 60: Coste Total del Proyecto

El coste total de proyecto asciende a 6800.30 €. **SEIS MIL OCHOCIENTOS EUROS CON TREINTA CÉNTIMOS**

IV ANEXO DE DOCUMENTACIÓN



Reseña de Estación Permanente - ERGNSS

2-may-2020

Situación:

Código.....: ALAC
Nombre.....: Alicante
Código IERS: 13433M001
Instalación....: 03 de junio de 1998

Municipio: Alacant/Alicante

Provincia: Alicante/Alacant

Localización.: Puerto de Alicante. Edificio del mareógrafo

Construcción: Hexaedro de hormigón armado, torre metálica de 3 m de altura. La marca de coordenadas se encuentra en la cara superior del hexaedro.

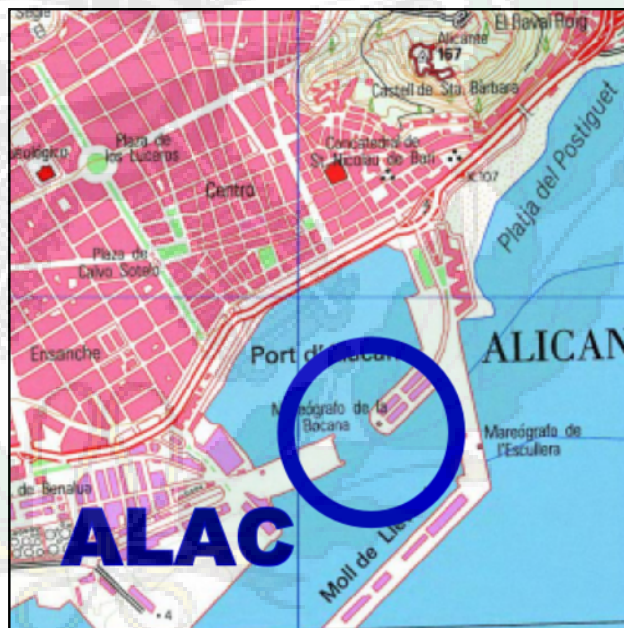
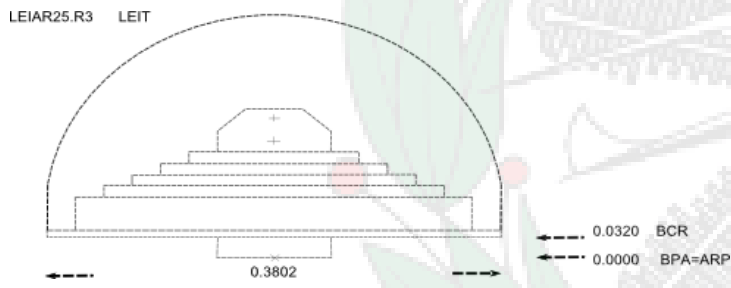
Coordenadas ETRS89:

Longitud.....: - 0° 28' 52,43761"	X.....:	5009051.386 m.
Latitud.....: 38° 20' 20,10327"	Y.....:	-42072.486 m.
Altitud elipsoidal: 60.332 m.	Z.....:	3935057.482 m.
X UTM.....: 720135.927 m.	Altitud sobre el nivel medio del mar:	
Y UTM.....: 4246422.291 m.		
Huso.....: 30		10.482 m.

Instrumentación:

Receptor: LEICA GR25
Antena: LEIAR25.R3 LEIT **Altura:** 3.0350 m. (BPA)
Offset de centros de fase de antena: L1 0.162 m. L2 0.159 m.

Esquema antena



Información adicional:

Esta estación permanente, además de a la red ERGNSS, pertenece a la siguiente red:

- Red de EUREF Permanent Network (EPN): <http://www.epncb.oma.be>

Datos horarios a 1, 5, 15 y 30 segundos y diarios a 30 segundos
<ftp://ftp.geodesia.ign.es>

Emite correcciones diferenciales a través del Caster <http://ergnss-ip.ign.es> a través de los puntos de montaje:

- ALAC0 formato de la corrección RTCM versión RTCM 3.1
- ALAC1 formato de la corrección RTCM versión RTCM 2.3

E-mail de contacto: buzon-geodesia@fomento.es

Observaciones:

Empty box for observations.

Referencias

- [1] EGNOS USER SUPPORT, *LPV Procedures Map*, Recuperado: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map.
- [2] MARÍA DEL CARMEN FURQUET GASCÓN, *Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/heliódromos*, Universitat Politècnica de València. Julio 2016
- [3] D. ALEJANDRO SÁNCHEZ DURÁN, *Análisis para la implementación del sistema EGNOS en aeronaves no tripuladas para aplicaciones de validación de procedimientos SBAS*, Universitat Politècnica de València. Julio 2018
- [4] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *BLOQUE III. Navegación Aérea*, Apuntes. Departamento Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.
- [5] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *Constelaciones GNSS*, Apuntes. Departamento Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.
- [6] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, *Trilateration — Measurement*, Enciclopedia Britannica.
- [7] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *GPS General Introduction*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_General_Introduction#GPS_Architecture.
- [8] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *GLONASS General Introduction*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_General_Introduction.
- [9] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Galileo General Introduction*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction.
- [10] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *BeiDou General Introduction*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction.
- [11] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *BeiDou Services*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Services.
- [12] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Title: NAVIC*, Recuperado: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>.
- [13] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Title: QZSS*, Recuperado: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/QZSS>.
- [14] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Title: GNSS Performances*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Performances.
- [15] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Title: SBAS Fundamentals*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals
- [16] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *0_GPS Modelos matemáticos*, Apuntes. Departamento Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.

- [17] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *WAAS Services*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/WAAS_Services
- [18] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *MSAS Performances*, Recuperado: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/MSAS_Performances
- [19] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Title: GAGAN*, Recuperado: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GAGAN>
- [20] ESSP AND GSA, *EGNOS Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation*.
- [21] PH.D. ISRAEL QUINTANILLA, *5 Sistemas de Aumentación EGNOS 2019 v5*, Apuntes. Departamento Ingeniería Cartográfica. Universitat Politècnica de València.
- [22] SC-159 RTCA DO-229D, *Title: MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE STANDARDS FOR GLOBAL POSITIONING SYSTEM/WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM AIRBORNE EQUIPMENT*, (Appendix A) Recuperado: <http://read.pudn.com/downloads775/ebook/3071458/RTCA%20DO-229D.pdf>
- [23] EUROPEAN SPACE AGENCY, *THE EGNOS SIGNAL EXPLAINED*, Recuperado: http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/2005%20Updated%20Fact%20Sheets/fact_sheet_12.pdf
- [24] EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY, EGNOS, *Title: Open Service (OS). Service Definiton Document.*, Recuperado: https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/brochure_os_2017_v6.pdf
- [25] EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY, *EGNOS Safety of Life (SoL). Service Definiton Document 2019*, Recuperado: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf
- [26] EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY, *EGNOS Data Access Service (EDAS). Service Definiton Document*, Recuperado: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_edas_sdd_in_force.pdf
- [27] ICAO DOC 9613, *Performanced-based Navigation (PBN) Manual*. 4th edition, 2013.
- [28] JOAN VILA CARBÓ, *Performanced-Based Navigation. Approach Procedures*, Apuntes. Gestión del Espacio Aéreo II. Universitat Politècnica de València.
- [29] ICAO ANNEX 10, *Volume I. Radio Navigation Aids*, Seventh Edition, July 2018.
- [30] MINISTERIO DE TRANSPORTE, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA, GOBIERNO DE ESPAÑA, *Conoce ENAIRE*, Recuperado: https://www.enaire.es/sobre_enaire/conoce_enaire

- [31] CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, *Instituto Geográfico Nacional. Información descriptiva*, Recuperado:
https://www.enaire.es/sobre_enaire/conoce_enaire
- [32] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Availability*, Recuperado:
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Availability>
- [33] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Continuity*, Recuperado:
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Continuity>
- [34] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Accuracy*, Recuperado:
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Accuracy>
- [35] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Integrity*, Recuperado:
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>
- [36] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report April 2020*.
- [37] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report March 2020*.
- [38] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report February 2020*.
- [39] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report January 2020*.
- [40] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report December 2019*.
- [41] THE EGNOS SERVICE PROVIDER, *Monthly Performance Report April 2019*.
- [42] NAVIPEDIA. EUROPEAN SPACE AGENCY, *Interfaces and Protocols*, Recuperado:
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Interfaces_and_Protocols
- [43] INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEODÈSIC DE CATALUNYA, *Posproceso-Ficheros RINEX*, Recuperado:
<https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Xarxes-geodesiques/Posproceso-Ficheros-RINEX>
- [44] EGNOS AND ESSP, *EDAS FTP Service User Information Package*. Version 1.3 11/11/2016.