



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Validación de aproximaciones SBAS y GBAS.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Andreu Felices, Lucía

Tutor/a: Quintanilla García, Israel

Cotutor/a: Gallego Salguero, Áurea Cecilia

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Validación de aproximaciones SBAS y GBAS

Lucía Andréu Felices

Tutor: Israel Quintanilla García

Cotutora: Áurea Cecilia Gallego Salguero

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería Aeroespacial

Curso 2022-23

València, 17 de julio de 2023

Resumen

Este documento realiza un análisis de los parámetros de calidad (precisión, integridad, disponibilidad y continuidad) de la estación permanente de Santiago de Compostela utilizando datos oficiales del Instituto Geográfico Nacional y de EGNOS, y procesándolos a través del software Pegasus de Eurocontrol. Este análisis simula uno de los pasos que se llevan a cabo en el proceso de validación de un procedimiento instrumental, por lo que ha servido para determinar la idoneidad del aeropuerto de Santiago de Compostela para incorporar un posible procedimiento LPV-200, que tiene las mínimas más exigentes de las aproximaciones habilitadas por SBAS. Previamente, se ofrece el contexto teórico en el que se enmarcan estos procedimientos. Los resultados concluyen que los parámetros de calidad analizados permitirían incorporar este servicio, si bien los requisitos de continuidad y el límite de alerta vertical requieren de medidas de seguridad adicionales.

Resum

Aquest document realitza un anàlisi dels paràmetres de qualitat (precisió, integritat, disponibilitat i continuïtat) de l'estació permanent de Santiago de Compostela utilitzant dades oficials de l'Institut Geogràfic Nacional i d'EGNOS, i processant-les a través del programari Pegasus de l'Eurocontrol. Aquest anàlisi simula un dels passos que es duen a terme en el procés de validació d'un procediment instrumental, i per tant ha servit per determinar la idoneïtat de l'aeroport de Santiago de Compostela per incorporar un possible procediment LPV-200, l'aproximació habilitada per SBAS de requisits més exigents. Prèviament, s'ofereix el context teòric en el qual s'emmarquen aquests procediments. Els resultats conclouen que els paràmetres de qualitat analitzats permetrien incorporar aquest servei, encara que serien necessàries mesures de seguretat addicionals per garantir els requisits de continuïtat i el límit d'alerta vertical.

Abstract

This document performs an analysis of the quality parameters (accuracy, integrity, availability, and continuity) of the permanent GNSS station in Santiago de Compostela, by processing official data from the National Geographic Institute and EGNOS with Eurocontrol's Pegasus software. This analysis simulates one of the steps carried out in the validation process of an instrumental procedure, thus serving to determine the suitability of Santiago de Compostela Airport to incorporate a LPV-200 procedure, the SBAS-enabled approach with the strictest requirements. Before that, the theoretical context in which these procedures are framed is provided. The results conclude that the analyzed quality parameters would allow for the incorporation of this service, but additional security measures would be necessary to ensure continuity and vertical alert limit requirements.

Índice general

1. Preámbulo del documento	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
I Desarrollo teórico	
2. Sistemas de posicionamiento basados en satélite	5
2.1. Principio de funcionamiento	5
2.2. Diferentes enfoques de posicionamiento	6
2.2.1. Pseudorrangos de código y fase	7
2.2.2. Métodos de posicionamiento	7
2.2.2.1. Posicionamiento absoluto	7
2.2.2.2. Posicionamiento relativo	7
2.2.2.3. Posicionamiento diferencial	8
2.3. Sistemas GNSS	9
2.3.1. GPS	9
2.3.2. GLONASS	10
2.3.3. Galileo	10
2.3.4. BeiDou	11
2.3.5. Sistemas regionales	11
2.4. Segmentos	12
2.4.1. Segmento del espacio	12
2.4.2. Segmento de control	12
2.4.3. Segmento de usuario	12
2.5. Fuentes de error GNSS	13
2.5.1. Errores del satélite	13
2.5.2. Errores en la propagación de la señal	13
2.5.3. Errores del receptor	14

3. Procedimientos <i>Performance-Based Navigation</i> (PBN)	15
3.1. Componentes	16
3.1.1. Especificaciones de navegación	16
3.1.1.1. RNAV	16
3.1.1.2. RNP	17
3.1.2. Infraestructura de ayudas a la navegación	18
3.1.3. Aplicación de navegación	18
3.2. PBN como elemento del concepto de espacio aéreo	19
3.3. Parámetros de calidad	19
3.3.1. Precisión	19
3.3.2. Integridad	20
3.3.3. Continuidad	22
3.3.4. Disponibilidad	22
4. RNP APCH	23
4.1. Aproximaciones de no precisión	24
4.1.1. LNAV	24
4.1.2. LP	24
4.2. Aproximaciones de precisión	24
4.2.1. LNAV/VNAV	25
4.2.2. LPV	25
4.2.2.1. Marco de implementación LPV	26
5. Sistemas de Aumentación	27
5.1. ABAS	27
5.2. GBAS	28
5.3. SBAS	29
5.3.1. Mensaje e información SBAS	30
5.3.2. Los diferentes sistemas SBAS	30
5.3.2.1. WAAS	32
5.3.2.2. MSAS	32
5.3.2.3. GAGAN	33
5.3.2.4. Otros sistemas en desarrollo	33
5.4. Beneficios de SBAS y comparación con GBAS	34
6. EGNOS: el sistemas SBAS europeo	35
6.1. Servicios	35
6.1.1. Open Service	35
6.1.2. Safety of Life	36
6.1.3. EDAS	36

6.2.	Arquitectura	37
6.2.1.	Segmento del espacio	37
6.2.2.	Segmento de tierra	38
6.2.3.	Segmento de soporte	39
6.2.4.	Segmento de usuario	39
6.3.	Limitaciones	39
6.3.1.	Actividad Ionosférica	40
6.3.2.	Atenuación de las señales GPS o EGNOS	41
6.3.3.	Interferencias: Jamming y Spoofing	42
6.3.4.	Cambios en las constelaciones GPS	42
7.	Evolución histórica de SBAS y GBAS en Europa	43
7.1.	SBAS	43
7.2.	GBAS	44
7.3.	SESAR	46
8.	Formato RINEX	47
8.1.	Nomenclatura	48
8.2.	Archivos SBAS (RINEX 2)	49
8.3.	Archivos de Navegación (RINEX 3)	50
8.4.	Archivos de Observación (RINEX 3)	51
II	Proceso de Validación	
9.	Validación: parte del proceso de diseño	57
9.1.	Validación en tierra	57
9.1.1.	Revisión independiente del diseño IFP	59
9.1.2.	Validación previa al vuelo	59
9.2.	Validación en vuelo	59
9.2.1.	Evaluación en simulador	60
9.2.2.	Evaluación en vuelo	60
9.3.	Pegasus	60
10.	Metodología	61
10.1.	Elección de aeropuertos	61
10.1.1.	Aeropuerto de Santiago - Rosalía de Castro	61
10.2.	Validación a largo plazo	62
10.3.	Análisis a corto plazo	63
10.3.1.	Elección de los días a evaluar	63
10.3.2.	Descarga de datos	64

10.3.3. Preproceso de datos	65
10.3.4. Proceso de datos: Pegasus	66
10.3.4.1. Programa Convertor	67
10.3.4.2. Programa GNSS_Solution	67
10.3.4.3. MFile Runner	68
11. Resultados	71
11.1. Validación a largo plazo	71
11.1.1. Precisión	71
11.1.2. Integridad	71
11.1.3. Disponibilidad	71
11.1.3.1. Disponibilidad SIS	72
11.1.3.2. Disponibilidad de la Operación	72
11.1.4. Continuidad	72
11.2. Validación a corto plazo	72
11.2.1. Precisión	72
11.2.2. Integridad	73
11.2.3. Disponibilidad	77
11.2.4. Continuidad	78
11.3. Análisis	79
11.3.1. Análisis a largo plazo	79
11.3.2. Análisis a corto plazo	80
11.3.2.1. Comparación con datos oficiales	81
12. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	87
III Pliego de condiciones	
13. Pliego de condiciones	91
13.1. Condiciones generales	91
13.1.1. Real Decreto 488/1997	91
13.2. Condiciones de especificaciones técnicas	92
13.2.1. Hardware	92
13.2.2. Software	93
13.2.3. Conexión a internet	93
13.2.4. Conocimientos previos	93
13.2.5. Supervisión	94

IV Presupuesto

14. Presupuesto	97
14.1. Introducción	97
14.2. Estado de mediciones	98
14.3. Desglose de costes unitarios	98
14.3.1. Coste de material y software unitario	98
14.3.1.1. Equipo informático	99
14.3.1.2. Software	99
14.3.2. Coste de personal cualificado unitario	99
14.3.3. Coste de oficina unitario	100
14.4. Desglose de costes totales	100
14.4.1. Coste de material y software total	100
14.4.2. Coste de personal cualificado total	101
14.4.3. Coste de oficina total	101
14.5. Resumen del presupuesto total	101

V Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Bibliografía	107
---------------------	------------

Índice de figuras

1.	Diseño de un procedimiento convencional [1]	1
2.	Diseño de un procedimiento PBN [1]	1
3.	Principio de funcionamiento del posicionamiento por satélite [2]	6
4.	Principio de posicionamiento relativo [2]	8
5.	Principio de posicionamiento diferencial [2]	8
6.	Habilitadores del concepto de espacio aéreo, entre los que se incluye la PBN con sus tres componentes [10]	19
7.	Diagrama de Stanford horizontal	21
8.	Cilindro de protección de la aeronave [14]	22
9.	Mínimas de la especificación <i>Required Navigation Performance Approach</i> (RNP APCH) [14]	23
10.	Diferencia entre la guía lateral linear y angular, mostradas respectivamente de izquierda a derecha [1]	26
11.	Arquitectura del sistema GBAS [21]	29
12.	Disponibilidad de procedimientos APV/LPV, a Junio 2019 [23]	32
13.	Estaciones RIMS de EGNOS [34]	36
14.	Esquema de la arquitectura de EGNOS [22]	37
15.	Evolución del número de manchas solares durante el ciclo solar número 25 [36]	40
16.	Evolución temporal de los errores y límites de protección durante el 3 de marzo de 2023 [39]	41
17.	Número de procedimientos EGNOS en estado operacional, a 25 de abril de 2023 [43]	44
18.	Ejemplo de encabezado e información en un fichero SBAS [56]	50
19.	Extracto de un fichero de navegación [57]	52
20.	Encabezado de un fichero de observación [57]	53
21.	Extracto de la información contenida en un fichero de observación [57]	53

22.	Esquema del proceso IFP [13]	58
23.	Localización del Aeropuerto de Santiago-Rosalía de Castro y la estación ERGNSS SNTG	62
24.	Continuidad en condiciones de baja radiación solar	64
25.	Continuidad en condiciones de alta radiación solar en mitad del ciclo solar 25	64
26.	Ficheros de observación y navegación descargados del IGN para el 10 de abril de 2023	65
27.	Fichero SBAS descargado del servicio EDAS de EGNOS para del 10 de abril de 2023	65
28.	Secuencia de comandos ejecutados para descomprimir los archivos de observación y navegación	66
29.	Archivos a procesar con Pegasus para el día 10 de abril de 2023	66
30.	Interfaz del programa Convertor	67
31.	Resultados del programa Convertor	68
32.	Interfaz del programa GNSS_Solution	69
33.	Información gráfica que se obtiene del programa GNSS_Solution	69
34.	Interfaz del programa MFile Runner	70
35.	Diagrama de Stanford horizontal para la estación SNTG, 10 de abril de 2023	73
36.	Diagrama de Stanford vertical para la estación SNTG, 10 de abril de 2023	73
37.	Diagrama de Stanford horizontal para la estación SNTG, 11 de abril de 2023	74
38.	Diagrama de Stanford vertical para la estación SNTG, 11 de abril de 2023	74
39.	Histograma de integridad horizontal para la estación SNTG, 10 de abril de 2023	75
40.	Histograma de integridad vertical para la estación SNTG, 10 de abril de 2023	75
41.	Histograma de integridad horizontal para la estación SNTG, 11 de abril de 2023	76
42.	Histograma de integridad vertical para la estación SNTG, 11 de abril de 2023	76
43.	Disponibilidad combinada, 10 de abril de 2023 [63]	77
44.	Disponibilidad combinada, 11 de abril de 2023 [63]	77
45.	Continuidad combinada, 10 de abril de 2023 [64]	78
46.	Continuidad combinada, 11 de abril de 2023 [64]	78
47.	Datos diarios de EGNOS para la estación SDC, PRN136, el 10 de abril de 2023 [72]	81
48.	Histograma HPE con percentil 95	82
49.	Histograma VPE con percentil 95	82
50.	Probabilidad acumulada para los límites de protección	82
51.	Evolución del HPE y HPL para la estación ERGNSS SNTG durante el 10 de abril	83
52.	Evolución del HPE y HPL para la estación RIMS SDC durante el 10 de abril [39]	83
53.	Evolución del VPE y VPL para la estación ERGNSS SNTG durante el 10 de abril	84
54.	Evolución del VPE y VPL para la estación RIMS SDC durante el 10 de abril [39]	85

Índice de tablas

1.	Características de los sistemas GNSS globales [3] [4] [6] [7]	11
2.	Especificaciones de navegación y sus asociadas precisiones laterales para cada fase de vuelo (NM) [10]	17
3.	Requisitos para los distintos tipos de aproximaciones [12]	18
4.	Límites de alerta para distintas aproximaciones [12]	20
5.	Tipos de mensajes SBAS [22]	31
6.	Satélites GEO de EGNOS [35]	38
7.	Procedimientos SBAS operacionales en España, a 25 de abril de 2023 [43]	45
8.	Tipos de archivos en RINEX 2 [54]	47
9.	Tipos de archivos en RINEX 3 [55]	48
10.	Formato de la información de un fichero SBAS en formato RINEX 2 [54]	50
11.	Formato de la información de un fichero SBAS en formato RINEX 2 [54]	51
12.	Descripción del extracto de información del fichero de observación para el satélite G04	54
13.	Coordenadas de la estación SNTG [61], y el ARP del Aeropuerto de Santiago [62]	62
14.	Precisión EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]	71
15.	Máximo riesgo de integridad EGNOS LPV-200 [66, 67, 68, 69, 70, 71]	71
16.	Disponibilidad SIS de EGNOS (%) en los satélites geoestacionarios de EGNOS [66]	72
17.	Disponibilidad EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]	72
18.	Continuidad EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]	72
19.	Valores de precisión para la estación SNTG, 10 de abril de 2023	72
20.	Valores de precisión para la estación SNTG, 11 de abril de 2023	73
21.	Comparación y tabla de errores entre los datos obtenidos mediante Pegasus para la estación SNTG el día 10/04/2023, y los datos oficiales de la RIMS SDC para el mismo día	81

22.	Comparación y tabla de errores entre los datos obtenidos mediante Pegasus para la estación SNTG el día 11/04/2023, y los datos oficiales de la RIMS SDC para el mismo día	84
23.	Conjunto de equipos informáticos y software	98
24.	Personal específico para el desarrollo del proyecto	98
25.	Oficina para el desarrollo del proyecto	98
26.	Amortización del equipo informático	99
27.	Coste unitario del software utilizado	99
28.	Coste unitario del personal cualificado	100
29.	Coste total del material y software utilizado	100
30.	Coste total del personal cualificado	101
31.	Coste total de la oficina	101
32.	Resumen del presupuesto total por conceptos	101
33.	Relación del trabajo con los Objetivos del Desarrollo Sostenible de la agenda 2030	105

Listado de siglas empleadas

AAIM	<i>Aircraft Autonomous Integrity Monitoring.</i>
ABAS	<i>Airborne-Based Augmentation System.</i>
AL	<i>Alert Limit.</i>
ANGA	<i>Augmented Navigation for Africa.</i>
APV	<i>Approach with Vertical Guidance.</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility.</i>
ATM	<i>Air Traffic Management.</i>
ATS	<i>Air Traffic Services.</i>
BDSBAS	<i>BeiDou Satellite Based Augmentation System.</i>
CCF	<i>Central Control Facility.</i>
CDFA	<i>Continuous Descent Final Approach.</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i>
CPF	<i>Central Processing Facility.</i>
DA/H	<i>Decision Altitude/Height.</i>
DGNSS	<i>Differential GNSS.</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency.</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service.</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay System.</i>
ERGNSS	<i>Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS.</i>
ESA	<i>European Space Agency.</i>
ESSP	<i>European Satellite Services Provider.</i>
EWAN	<i>EGNOS Wide Area Network.</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration.</i>
FAS DB	<i>Final Approach Segment Data Block.</i>
FDE	<i>Fault Detection and Exclusion.</i>

FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access.</i>
FOC	<i>Final Operational Capability.</i>
GAGAN	<i>GPS Aided GEO Augmented Navigation.</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System.</i>
GEO	<i>Geoestacionario.</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error.</i>
GLONASAS	<i>Global Navigation Satellite System.</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems.</i>
GPS	<i>Global Positioning Service.</i>
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame.</i>
HMI	<i>Hazardously Misleading Information.</i>
HNSE	<i>Horizontal Navigation System Error.</i>
HPE	<i>Horizontal Precision Error.</i>
HPL	<i>Horizontal Protection Level.</i>
HSI	<i>Horizontal Security Index.</i>
IFP	<i>Instrumental Flight Procedure.</i>
IOV	<i>In orbit validation.</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System.</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame.</i>
KASS	<i>Korean Augmentation Satellite System.</i>
LAAS	<i>Local-Based Augmentation System.</i>
LNAV	<i>Lateral Navigation.</i>
LNAV/VNAV	<i>Lateral Navigation with Vertical Navigation.</i>
LP	<i>Localizer Performance.</i>
LPV	<i>Localizer Performance with Vertical Guidance.</i>
MCC	<i>Mission Control Center.</i>
MDA/H	<i>Minimum Descent Altitude/Height.</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit.</i>
MI	<i>Misleading Information.</i>
MOPS	<i>Minimum Operational Performance Standards.</i>
MSAS	<i>Multi-functional Transport Satellite Based Augmentation System.</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations.</i>

NPA	<i>Non Precision Approach.</i>
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional.
OS	<i>Open Service.</i>
PA	<i>Precision Approach.</i>
PACF	<i>Performance Assessment and Check-out Facility.</i>
PBN	<i>Performance-Based Navigation.</i>
PE	<i>Position Error.</i>
PL	<i>Protection Level.</i>
PRN	<i>Pseudo-random noise.</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System.</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring.</i>
RIMS	<i>Range Integrity Monitoring Station.</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format.</i>
RMS	<i>Root Mean Square.</i>
RNAV	<i>Area Navigation.</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance.</i>
RNP APCH	<i>Required Navigation Performance Approach.</i>
RNP AR APCH	<i>Required Navigation Performance Authorization Required Approach.</i>
RVR	<i>Runway Visual Range.</i>
SA	<i>Selective Availability.</i>
SARPS	<i>Standards and Recommended Practices.</i>
SBAS	<i>Space-Based Augmentation System.</i>
SDCM	<i>System of Differential Correction and Monitoring.</i>
SES	<i>Single European Sky.</i>
SESAR JU	<i>Single European Sky ATM Research Joint Undertaking.</i>
SI	<i>Security Index.</i>
SIS	<i>Signal-In-Space.</i>
SoL	<i>Safety-of-Life.</i>
SouthPAN	<i>Southern Positioning Augmentation Network.</i>
TTA	<i>Time-To-Alert.</i>
UDRE	<i>User Differential Range Error.</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated.</i>

VDB	<i>VHF Data Broadcast.</i>
VHF	<i>Very High Frequency.</i>
VNSE	<i>Vertical Navigation System Error.</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Radio Range.</i>
VPE	<i>Vertical Precision Error.</i>
VPL	<i>Vertical Protection Level.</i>
VSI	<i>Vertical Security Index.</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System.</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System - 1984.</i>

Capítulo 1

Preámbulo del documento

1.1. Introducción

La navegación aérea se ha basado históricamente en métodos instrumentales como las radioayudas en tierra. Si bien estos métodos han sido funcionales, obligaban a las aeronaves a sobrevolar dichas radioayudas, lo que resultaban en rutas compuestas por múltiples tramos con cambios frecuentes de rumbo, como se puede observar en la Figura 1.

La llegada de la Navegación Basada en el Rendimiento o *Performance-Based Navigation* (PBN) ha permitido la publicación de procedimientos más flexibles basados principalmente en Sistemas Globales de Navegación por Satélite o *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS). Con este método, los puntos de ruta o waypoints pueden determinarse como coordenadas virtuales sin necesidad de colocar radioayudas terrestres en dichos puntos, creando un método de navegación más natural con tramos optimizados, tal y como se observa en la Figura 2. La mencionada PBN supuso un cambio de paradigma en la navegación aérea: la capacidad de navegación no se establece en términos de sensores, sino mediante requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, también denominados parámetros de calidad.

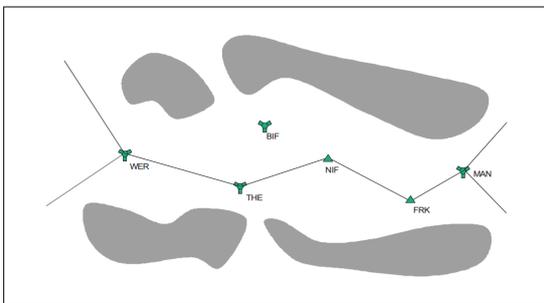


Figura 1: Diseño de un procedimiento convencional [1]

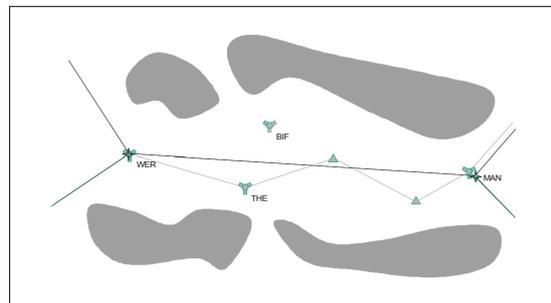


Figura 2: Diseño de un procedimiento PBN [1]

Las ventajas de la navegación PBN se acentúan en el caso de los procedimientos de aproximación a aeropuertos, ya que permiten aproximaciones de precisión como los métodos tradicionales, pero con adicionales ventajas como la posibilidad de implementar tramos curvos si se requiere, lo que permite optimizar rutas y reducir costes e impacto ambiental. No obstante, debido a su naturaleza crítica, estas aproximaciones necesitan sistemas de aumentación para poder cumplir con los estrictos requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad que imponen los organismos reguladores como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

Con el objetivo principal de replicar uno de los pasos llevados a cabo en la validación de estos procedimientos, este documento analiza los parámetros de calidad de una teórica aproximación de tipo LPV-200, que es el procedimiento con los requisitos mínimos más estrictos que puede ser operado por el sistema europeo de aumentación basado en satélite. El uso de datos de una estación permanente cercana al aeropuerto de Santiago de Compostela-Rosalía de Castro, el procesado de los datos mediante el software Pegasus de Eurocontrol y el análisis de los resultados permite obtener conclusiones sobre la factibilidad de la publicación de un potencial procedimiento LPV-200 en dicho aeropuerto, del que actualmente carece.

Para proporcionar una visión completa, se establece previamente un marco teórico que engloba los procedimientos de aproximación GNSS dentro de la PBN y el concepto del espacio aéreo.

1.2. Objetivos

Los objetivos que se persiguen en el presente documento son los siguientes:

- Realizar un estudio de los procedimientos PBN, dentro de los que se encuentran las especificaciones *Required Navigation Performance Approach* (RNP APCH) que dan lugar a los procedimientos *Localizer Performance with Vertical Guidance* (LPV) operados por sistemas de aumentación basados en GNSS, enmarcándolos además dentro del contexto de la navegación aérea y las regulaciones de la OACI.
- Analizar el estado actual de los procedimientos basados en el *European Geostationary Navigation Overlay System* (EGNOS), así como de EGNOS en sí, para entender su funcionamiento y su relación con los procedimientos de aproximación.
- Utilizar el software Pegasus de Eurocontrol con datos de fuentes oficiales como EGNOS y el Instituto Geográfico Nacional, para poder obtener los parámetros de calidad de la estación permanente localizada en la ciudad de Santiago de Compostela.
- Evaluar los resultados de la validación y determinar, en base a estos, si es factible crear un procedimiento de aproximación LPV-200 en el aeropuerto de la ciudad estudiada.

Parte I

Desarrollo teórico

Capítulo 2

Sistemas de posicionamiento basados en satélite

Los sistemas de posicionamiento basados en satélite son capaces de determinar posiciones de receptores en tierra usando satélites artificiales, para los que sus posiciones en cada época se suponen conocidas. El término GNSS comprende cada uno de los sistemas individuales de posicionamiento basado en satélite, así como la combinación o aumentación de cada uno de estos [2]. Los sistemas GNSS son los que permiten los procedimientos PBN dentro de los que se encuentra el procedimiento de aproximación LPV-200. La comprensión del funcionamiento de estos sistemas, así como de su estado del arte, resulta imprescindible a la hora de tratar estos procedimientos.

2.1. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de los sistemas GNSS consiste en la determinación del tiempo que requiere la señal codificada en viajar desde el satélite, que se supone de coordenadas conocidas, hasta el receptor, cuyas tres coordenadas son desconocidas y se desean determinar. Siendo ρ^s el vector posición de cada satélite con respecto al centro de la Tierra, y ρ_r el vector posición del receptor, también con respecto al centro de la Tierra, la distancia geométrica ρ entre ambos viene dada por la Ecuación (1), tal y como se puede deducir de la Figura 3. Cada medición realizada a cada satélite define un lugar geométrico que correspondería a la superficie de una esfera con centro en el satélite, por lo que, aparentemente, las tres coordenadas del receptor podrían obtenerse de las mediciones de tres satélites [2].

No obstante, para que esto sea cierto los relojes del satélite y receptor deberían estar estrechamente sincronizados, hecho que conocemos ser poco probable debido a que los receptores no cuentan con relojes de alta precisión por su elevado coste, y que sí están presentes sin embargo en los satélites. Es por ello que el reloj del receptor se encuentra desfasado con respecto al del satélite,

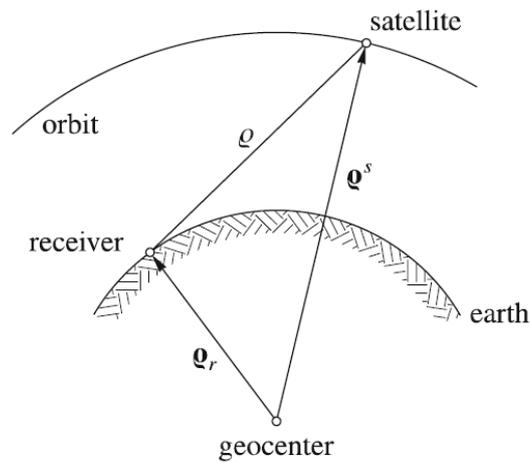


Figura 3: Principio de funcionamiento del posicionamiento por satélite [2]

y en consecuencia, la distancia debe ser corregida con un factor de corrección. La distancia final es llamada “pseudorange”, R , y puede ser modelada como se muestra en la Ecuación (2) [2], donde $\Delta\rho$ representa el error del pseudorange que se puede determinar multiplicando el error de sincronización de los relojes, δ , por la velocidad de la luz, c . De dicha ecuación se deduce que son necesarias 4 mediciones simultáneas para resolver las cuatro incógnitas, a saber las tres coordenadas de posición del receptor y la de-sincronización del reloj, supuesta constante para todas las mediciones debido a que el desfase viene determinado principalmente por el reloj del receptor [2].

$$\rho = \|\boldsymbol{\rho}^s - \boldsymbol{\rho}_r\| \quad (1)$$

$$R = \rho + \Delta\rho = \rho + c\delta \quad (2)$$

2.2. Diferentes enfoques de posicionamiento

Una vez explicado el principio de funcionamiento básico en el que se basan los sistemas GNSS, es importante mencionar que existen múltiples enfoques mediante los que se puede determinar la posición en la práctica. Estos métodos utilizan diferentes tipos de pseudoranges o referencias espaciales, como se explica en esta sección. Además, el posicionamiento de un punto puede ser cinemático o estático, dependiendo de si el receptor está en movimiento o no; en tiempo real o mediante post-procesamiento; y puede ser para navegación o con fines topográficos, según se desee conocer la velocidad y la actitud o solo la posición.

2.2.1. Pseudorrangos de código y fase

Los pseudorrangos se pueden determinar utilizando la información codificada en la señal transmitida por el satélite, o utilizando la fase de la portadora. Utilizar la fase de la portadora provee una precisión mejorada, del orden de milímetros, en comparación con el uso del código, que provee una precisión aproximada del orden de metros debido a su mayor ruido [2].

No obstante, el uso de la portadora tiene desventajas asociadas, ya que si bien es sencillo determinar con qué fase llega ésta al receptor, determinar el número de ciclos completos o longitudes de onda de la portadora supone cálculos algorítmicos tediosos que añaden complejidad al proceso de determinación de la posición [2].

Las ecuaciones (3) y (4) muestran, con notación simplificada, las ecuaciones de observación de código y fase, respectivamente. En ellas se puede observar que la ecuación de fase tiene una incógnita adicional, N , que es el número de ciclos, también denominado ambigüedad, que aparece multiplicado por la longitud de onda λ y que se debe calcular adicionalmente en el proceso de posicionamiento. Las ecuaciones incluyen además el error de las órbitas, $d\rho$; los errores de los relojes del receptor y satélite δ_r y δ^s ; el retraso de la señal debido a efectos ionosféricos y troposféricos mediante las variables I y T ; y errores residuales mediante la variable ν [2].

$$R = \rho + d\rho + c(\delta_r - \delta^s) + I + T + \nu \quad (3)$$

$$\Phi = \rho + d\rho + c(\delta_r - \delta^s) + \lambda N + I + T + \nu \quad (4)$$

2.2.2. Métodos de posicionamiento

Existen diferentes métodos para determinar la posición utilizando sistemas de posicionamiento basados en satélite. Estos incluyen el posicionamiento absoluto, relativo y diferencial.

2.2.2.1. Posicionamiento absoluto

El posicionamiento absoluto implica el uso exclusivo de, al menos, cuatro satélites para determinar la posición de un receptor individual. En este caso, solo se requiere la información de los satélites y el receptor, sin realizar ningún proceso adicional de mejora o corrección de las mediciones [2].

2.2.2.2. Posicionamiento relativo

Por otro lado, el posicionamiento relativo tiene como objetivo determinar las coordenadas de un receptor con respecto de otro receptor o receptores cuyas coordenadas son conocidas. Este enfoque implica calcular el vector que une los dos puntos, comúnmente conocido como *baselínea* [2].

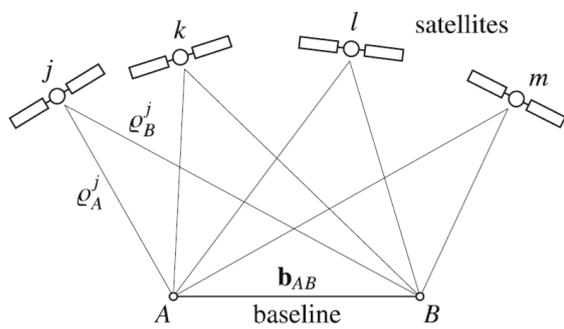


Figura 4: Principio de posicionamiento relativo [2]

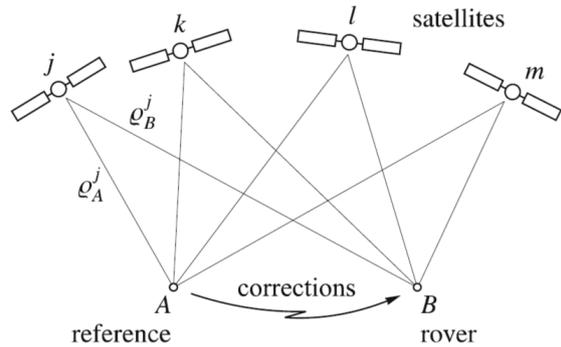


Figura 5: Principio de posicionamiento diferencial [2]

2.2.2.3. Posicionamiento diferencial

El posicionamiento diferencial o *Differential GNSS* (DGNSS) es una técnica que también utiliza al menos dos receptores. Sin embargo, su principio de funcionamiento es distinto al del posicionamiento relativo. De la localización del receptor que actúa como referencia y de las posiciones de los satélites se puede calcular un rango, diferente al rango medido. Luego, una estación de referencia (o red de estaciones) transmite correcciones diferenciales que se utilizan en el receptor de coordenadas desconocidas para eliminar errores inherentes al sistema GNSS. Tres grupos de errores se distinguen: errores debidos a los satélites, a la propagación de la señal, y al propio receptor, como se explica con detalle en la Sección 2.5. La técnica de DGNSS reduce los errores relacionados con los satélites y de propagación de señal, si bien errores no correlacionados como el multipath no se pueden mitigar [2].

A diferencia del posicionamiento relativo, que calcula la posición con respecto al receptor de referencia, el posicionamiento diferencial introduce correcciones para poder determinar, de manera absoluta, la posición del receptor. Esta puntualización se puede observar en las Figuras 4 y 5.

El posicionamiento diferencial utilizando una sola estación de referencia proporciona un método sencillo, pero puede dar resultados menos precisos cuando los receptores están alejados entre sí. En cambio, el concepto de sistema diferencial que utiliza una red de estaciones de referencia garantiza un rendimiento homogéneo del servicio en un área de cobertura más amplia, aunque esto implica una mayor complejidad y costes adicionales.

Este método toma especial relevancia cuando se tratan los sistemas de aumentación en aviación, ya que los sistemas de aumentación basados en tierra y espacio pueden entenderse como sistemas diferenciales GNSS, certificados, y con la capacidad adicional de proveer información de integridad.

2.3. Sistemas GNSS

Los sistemas GNSS incluyen múltiples constelaciones, siendo la más antigua y arraigada el sistema *Global Positioning Service* (GPS). En el contexto actual de navegación aérea, el GPS es especialmente importante, ya que es, a fecha de 2023, el único sistema GNSS aumentado por EGNOS. No obstante, es necesario conocer todos los sistemas, globales y regionales, para tener una visión completa del estado del arte.

2.3.1. GPS

El sistema GPS fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, logrando ser el primer sistema de posicionamiento desplegado en el espacio. Inicialmente diseñado para uso militar, el primer satélite operacional fue lanzado en 1989, y cuenta a 3 de julio de 2023 con 31 satélites operativos [3].

El GPS se basa en el sistema de referencia *World Geodetic System - 1984* (WGS-84), materializado originalmente por las coordenadas de 1500 puntos terrestres y con elipsoide propio. De igual forma, cuenta con un sistema temporal propio, relacionado con el sistema temporal atómico y referenciado al tiempo *Universal Time Coordinated* (UTC). Sin embargo, a diferencia de UTC, el tiempo GPS no incluye los *leap seconds* para mantener un sistema de referencia continuo. Actualmente, el tiempo GPS se define como el tiempo UTC más 18 segundos, aproximadamente [2].

En cuanto al segmento espacial del sistema, los satélites orbitan órbitas casi circulares con altitud aproximada de 20 200 km. Cada satélite cuenta con relojes de cesio o rubidio, que producen una frecuencia fundamental de 10.23 MHz [2]. Esta frecuencia se utiliza para derivar dos portadoras principales, L1 y L2, de 1575.42 MHz y 1227.60 MHz, respectivamente, y que se obtienen al multiplicar la frecuencia base por 154 y 120. La información se modula sobre estas portadoras mediante dos códigos conocidos como *Pseudo-random noise* (PRN). El primer código, denominado C/A, está disponible para todos los usuarios y se modula únicamente en la portadora L1. El segundo código, llamado P, es un código de precisión encriptado reservado para usuarios autorizados o militares y se modula en ambas portadoras. La técnica de acceso que utiliza es el *Code Division Multiple Access* (CDMA), de manera que una misma frecuencia de la portadora puede ser utilizada modulando sobre ella diferentes códigos [3].

A lo largo del tiempo, el sistema de posicionamiento estadounidense ha experimentado avances y modernizaciones continuas. Estos incluyen la desactivación en el año 2000 de la disponibilidad selectiva o *Selective Availability* (SA), que limitaba la precisión para los usuarios civiles, la introducción de nuevos bloques de satélites y la creación de nuevas señales civiles y militares. Estas y otras medidas han mejorado la robustez del sistema, proporcionando señales más resistentes a interferencias o bloqueos intencionales. La adición de nuevas frecuencias también ha mejorado la precisión del servicio al proporcionar redundancia y permitir una mejor modelización y mitigación

de los errores ionosféricos gracias a la multifrecuencia [2].

2.3.2. GLONASS

Continuando cronológicamente, el sistema *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) fue el siguiente en ser desarrollado, en este caso, por la Unión Soviética durante la Guerra Fría. Su constelación de 24 satélites alcanzó capacidad operativa completa en 1996, aunque posteriormente el número de satélites disminuyó debido a limitaciones económicas. En la actualidad el sistema se encuentra revitalizado de nuevo y en estado operativo con el mismo número de satélites [4].

El sistema de referencia que utiliza GLONASS es PE-90, también llamado PZ-90, y materializado por 26 estaciones terrestres. Este sistema cuenta con su propio elipsoide y sistema temporal. Sus satélites orbitan con una inclinación de 64.8° en 3 planos orbitales y a una altitud aproximada de 19 100 km [2].

Una diferencia fundamental de GLONASS con respecto a GPS (y al resto de sistemas) es su técnica de acceso múltiple. GLONASS cuenta con tres bandas de frecuencia, y utiliza el principio de *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), por lo que cada satélite transmite en dos frecuencias de portadoras propias. A diferencia de CDMA, es sabido que este método tiene una menor eficiencia espectral. Por este motivo, la modernización futura del sistema ruso incluye el cambio a FDMA, así como la adición de nuevas frecuencias [4].

2.3.3. Galileo

El sistema GNSS Galileo se desarrolló en Europa por parte de la *European Space Agency* (ESA) y la *European Commission and Council* para proveer a Europa de un sistema de posicionamiento civil propio para usar en aplicaciones de navegación, que fortaleciera la industria y dotara al continente de tecnología puntera [2].

Desarrollado desde la década de los noventa, los dos primeros satélites operativos, que formaban parte de la fase *In orbit validation* (IOV), se lanzaron desde la Guayana Francesa en 2011. Después de un segundo lanzamiento en 2012, y una vez completada la fase de validación en órbita, se prosiguió con el lanzamiento del resto de satélites con el objetivo de alcanzar *Final Operational Capability* (FOC). Los servicios iniciales fueron declarados el 15 de diciembre de 2016, y a fecha de junio de 2023, 28 satélites se encuentran en órbita, de los cuales sólo 22 se encuentran en estado operativo. Se espera que la constelación se encuentre completa antes de 2025 [5]. Las órbitas de los satélites desplegados son casi circulares, con una altitud aproximada de 23 222 km, inclinación de 56° y en tres planos equidistantes [6].

El sistema Galileo utiliza un marco de referencia llamado *Galileo Terrestrial Reference Frame* (GTRF), relacionado con el *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) y que difiere de

	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo
Satélites nominales MEO	24	24	24	30
Altitud	20 200 km	19 100 km	21 528 km	23 222 km
Inclinación	55°	64.8°	55°	56°
Planos orbitales	6	3	3	3
Servicios	-Libre -Safety-of-Life -Autorizado - -	-Libre -Safety-of-Life -Autorizado - -Búsqueda y Rescate -	-Libre -Safety-of-Life -Autorizado - -Informe de posición	-Libre -Safety-of-Life -Autorizado -Comercial -Búsqueda y Rescate -
Frecuencias	L1=1575.42 MHz L2=1227.60 MHz L5=1176.45 MHz	G1=1600.995 MHz G2=1248.06 MHz G3=1202.025 MHz	B1C= 1575.42 MHz B1I=1561.098 MHz B2a= 1176.45 MHz B2b=1207.14 MHz B3I= 1268.52 MHz	E1=1575.42 MHz E6=1278.75 MHz E5=1191.795 MHz E5a=1176.45 MHz E5b=1207.14 MHz
Técnica de acceso	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Sistema de referencia	WGS-84	PE-90	BDCS	GTRF
Sistema temporal	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo

Tabla 1: Características de los sistemas GNSS globales [3] [4] [6] [7]

él en 3 centímetros, aproximadamente. Los relojes de los satélites son de rubidio e hidrógeno, lo que posiciona a Galileo como el sistema GNSS más preciso [2]. Otro factor diferencial es que es el sistema GNSS que cuenta con mayor número de servicios, ofreciendo en exclusiva el servicio comercial [6].

2.3.4. BeiDou

El sistema BeiDou es el sistema desarrollado por el gobierno chino cuyos satélites se desplegaron completamente en junio de 2020 proveyendo cobertura mundial [7].

El sistema cuenta 24 satélites nominales *Medium Earth Orbit* (MEO), con inclinación orbital de 55°y que orbitan en tres planos orbitales a 21 528 km de altitud. Al igual que con todos los sistemas mencionados, cuenta con sistema de referencia y temporal propio, y utiliza CDMA. No obstante, una singularidad es que BeiDou es el único que cuenta con un servicio de informe de posicionamiento [6]. La Tabla 1 resume las principales características de los sistemas GNSS globales.

2.3.5. Sistemas regionales

El estado del arte de los sistemas GNSS se completa con los sistemas de cobertura regional.

Por un lado, el sistema *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS), desarrollado por Japón, provee cobertura regional en el este de Asia y Oceanía. Si bien está diseñado como un sistema de aumentación

de las señales GPS, también puede operar de manera independiente como sistema de posicionamiento. El sistema comenzó sus operaciones en 2018 con cuatro satélites, y en 2023 cuenta con un total de cinco, posicionados en órbitas que permiten tenerlos con elevación cercana a cénit sobre Japón [8].

Por otro lado, el sistema *Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS) es el sistema regional indio, que cubre India y una región que se extiende alrededor de ella 1 500 km. A fecha de 2023 cuenta con 7 satélites operativos, que permiten proveer servicios civiles y militares [9].

2.4. Segmentos

El correcto funcionamiento de cualquier sistema GNSS mencionado requiere de unos segmentos que son comunes a todos ellos, a saber el segmento del espacio, segmento de control y segmento del usuario.

2.4.1. Segmento del espacio

El segmento del espacio está principalmente constituido por los satélites de la constelación, dispuestos en número y forma que permita que al menos cuatro satélites sean visibles desde cada localización que se desee determinar. Dichos satélites proporcionan una plataforma para los relojes atómicos, ordenadores, transmisores de radio y equipamiento auxiliar, como paneles solares, necesarios para operar el sistema. Cada uno de estos satélites retransmite un mensaje (mensaje de navegación) que permite al usuario determinar la posición del mismo satélite para ciertas épocas, lo que permite eventualmente determinar la posición del receptor [2].

2.4.2. Segmento de control

Por su parte, el segmento de control se encarga de coordinar el sistema en su conjunto. Este segmento realiza tareas que incluyen la monitorización de los parámetros orbitales y de reloj de los satélites así como la transmisión del mensaje a los propios satélites. Está formado por estaciones de control máster que coordinan todas las actividades, estaciones de monitorización y antenas en tierra que actúan como vínculo hacia los satélites [2].

2.4.3. Segmento de usuario

El segmento de usuario, por último, comprende a los receptores de la información del sistema. Éstos pueden ser categorizados en militares o civiles (o autorizados y no autorizados), de manera que receptores civiles o no autorizados no podrían disponer de todos los potenciales servicios y

señales de los sistemas GNSS [2].

2.5. Fuentes de error GNSS

Las mediciones de los sistemas GNSS se ven afectadas por errores, que pueden ser agrupados en tres tipos: los relativos a los satélites, a la propagación de la señal, y al receptor.

2.5.1. Errores del satélite

Los errores del satélite incluyen errores en los parámetros de las órbitas y errores en el reloj.

Los satélites GPS están equipados con relojes atómicos de alta precisión, como relojes de rubidio y cesio, que son monitorizados constantemente por las estaciones de control en tierra. Aunque estos relojes proporcionan una gran precisión, todavía presentan errores en el orden de los microsegundos [2]. Para mitigar este error, se utiliza un modelo de polinomios de segundo orden que se transmite a través del mensaje de navegación (consultar la Sección 8.3).

Sin embargo, las efemérides de los satélites y las correcciones aplicadas a sus relojes a través de los polinomios tienen ciertas imprecisiones que tienen un límite en su predicción. Como resultado, el error residual en la posición de los satélites suele ser del orden del metro, mientras que los errores en los relojes pueden ser del orden de los 5 nanosegundos, lo que equivale aproximadamente a un metro y medio en la solución de posición [2].

2.5.2. Errores en la propagación de la señal

Los errores en la propagación de la señal incluyen errores debido a la ionosfera y a la troposfera. Como se extrae de las Ecuaciones (3) y (4), estos son errores sistemáticos que se introducen directamente en las ecuaciones de observación.

En primer lugar, los efectos ionosféricos surgen debido a la refracción de las ondas electromagnéticas al atravesar la ionosfera, región alta de la atmósfera ionizada por la radiación solar y que por tanto contiene iones y electrones libres. Esta refracción varía según la frecuencia de la señal y puede generar errores significativos en la posición estimada que alcancen un orden de magnitud de la decena de metro. Aunque existen modelos, como el modelo de Klobuchar, que estiman el retraso de las señales debido a la ionosfera, períodos de actividad solar aumentada pueden provocar efectos residuales impredecibles [2].

Por otro lado, la troposfera es un medio no dispersivo y eléctricamente neutro a las ondas de radio. Es la capa más cercana a la superficie terrestre, por lo que la densidad del aire es alta, variando con las condiciones meteorológicas y disminuyendo con la altitud. Estas variaciones causan re-

fracción de las señales GNSS y, por lo tanto, introducen retrasos que pueden degradar la precisión de la solución de posición hasta el orden de magnitud de los decímetros. Para modelar los efectos troposféricos se utilizan también diferentes modelos, como los de Hopfield o Saastamoinen [2].

2.5.3. Errores del receptor

Los errores en el receptor, por su parte, incluyen el desvío y variación del centro de fase de la antena, el estado del reloj del receptor, el ruido y el multipath.

En primer lugar, el centro de fase de una antena, que es su punto de referencia para las mediciones GNSS, no coincide con el centro geométrico de la antena, lo que provoca un desplazamiento del centro de la antena. Además, la posición del centro de referencia depende de la frecuencia de la señal y varía con la dirección de la señal recibida. En definitiva, el centro de fase de la antena no solo tiene un desvío, sino que este desvío es variable. Para mitigar esta fuente de error, que introduce errores del orden de los centímetros, se debe calibrar la antena [2].

Por otro lado, el receptor suele estar equipado con relojes de cristal de cuarzo, lo que hace que su precisión sea menor que la de los relojes de los satélites. El reloj del receptor puede introducir errores de hasta un milisegundo, por lo que es vital mitigar este error en el proceso de posicionamiento. Como se ha mencionado en la Sección 2.1, este error se mitiga al introducir una incógnita adicional en las ecuaciones de observación [2].

Además, el receptor GNSS cuenta con ruido interno que puede afectar el rendimiento del posicionamiento. Si bien este efecto depende también de la calidad del receptor, el error puede ser del orden de decímetros en mediciones de código y milímetros en mediciones de fase. La mitigación de este error se basa en un diseño mejorado de la antena [2].

Por último, el efecto multipath se produce cuando las señales GNSS se reflejan en diferentes superficies, como edificios o árboles, lo que hace que lleguen al receptor con una fase diferente. Este fenómeno provoca atenuación y retraso en la señal, lo que resulta en una solución de posición con precisión degradada, con errores del orden de magnitud del metro en el posicionamiento basado en código, o de centímetros si se utiliza la fase. El multipath se puede mitigar con un diseño mejorado de la antena, tecnología avanzada en el receptor o mediante el post-procesamiento de los datos [2].

Capítulo 3

Procedimientos PBN

El concepto de PBN fue introducido en 2008 en el Documento 9613 de la OACI: “Performance-based Navigation (PBN) Manual”. Este documento presentó una alternativa para la definición de los requisitos que los equipos de navegación aérea debían cumplir. A diferencia de los métodos basados en sensores, en los que el sistema usado para indicar la capacidad de navegación era mediante la obligatoriedad de llevar a bordo cierto equipamiento [10], los sistemas PBN utilizarían los conceptos de precisión, integridad, continuidad, y disponibilidad, estableciendo requisitos para cada tipo de operación [1]. El enfoque de la PBN permitía pues definir las especificaciones generales de navegación teniendo en cuenta los requisitos de la operación que se está diseñando, por lo que la solución en términos de sensores de navegación podía ser aquella que resultara más beneficiosa para el operador.

En este contexto, la PBN es a día de hoy una herramienta clave que permite un eficiente diseño y planificación del espacio aéreo: mediante el uso de *Area Navigation (RNAV)* y *Required Navigation Performance (RNP)* (explicados en la Sección 3.1.1.1 y 3.1.1.2, respectivamente) la creación de nuevas rutas en lugares óptimos es posible gracias a la PBN en tres dimensiones. Estas rutas, que pueden ser además de cualquier tipo (salida, cruce, llegada, aproximación o aproximación frustrada) suponen una solución a los potenciales problemas del espacio aéreo como la saturación de éste o los cuellos de botella [11].

Las ventajas de los procedimientos PBN frente a los basados en sensores son numerosas. Además de la ya mencionada posibilidad de crear nuevas rutas más eficientes, se reduce la necesidad de mantener procedimientos específicos para cada tipo de sensor o equipo de navegación. La PBN se posiciona pues como una solución económica y operacionalmente rentable, ya que permite obtener especificaciones de navegación más flexibles que pueden ser utilizadas por múltiples y diferentes sistemas de navegación. Además, con su desarrollo y adopción se elimina la necesidad de crear nuevos procedimientos para cada nuevo sistema de navegación [1], lo que resulta de especial conveniencia visto el rápido avance de las tecnologías y facilitando a su vez la incorporación de las

mismas.

3.1. Componentes

La PBN, como elemento del concepto del espacio aéreo, identifica 3 componentes. Éstos son, en primer y segundo lugar, la infraestructura de ayudas a la navegación y las especificaciones de navegación, que aplicadas en el contexto de espacio aéreo resultan en el tercer componente: la aplicación de navegación [11].

Estos tres componentes son dependientes entre sí, ya que cualquier aplicación de navegación debe estar basada en unas especificaciones de navegación y unas infraestructuras de ayudas asociadas, que pueden ser diferentes en cada concepto de espacio aéreo diferente.

3.1.1. Especificaciones de navegación

Las especificaciones de navegación definen las especificaciones técnicas y operativas que identifican el rendimiento y funcionalidad del equipo de navegación aérea, dados en términos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. En dichas especificaciones también se detallan qué sensores de navegación deben integrarse en el sistema o qué requisitos se imponen a la tripulación de vuelo [1].

Las especificaciones de navegación pueden ser especificaciones RNP o RNAV, dependiendo de si incluyen monitorización de rendimiento y alerta a bordo, o no, respectivamente [1]. Las once especificaciones definidas en el manual de la OACI, así como las precisiones asociadas para cada fase de vuelo se detallan en la Tabla 2. De esta tabla se pueden obtener ciertas observaciones, como que es posible que una secuencia de operaciones PBN sea utilizada desde la salida de una aeronave hasta su aproximación final. Cabe destacar que, si bien la precisión puede formar parte de la nomenclatura de una especificación de navegación, ésta precisión es sólo uno de los múltiples requisitos de rendimiento incluidos en dicha especificación.

Las especificaciones RNAV y RNP coexisten paralelamente, pero los esfuerzos futuros de desarrollo están centrados en este último, por lo que una transición de RNAV a RNP será recomendable en ciertas aplicaciones. Por ejemplo, tal y como se indica en la Tabla 2, para fases de crucero en zonas oceánicas tanto RNAV 10 como RNP 4 se encuentran disponibles, por lo que el uso de la especificación RNP será aconsejado por sus prestaciones mejoradas [10].

3.1.1.1. RNAV

El concepto RNAV se define como un método de navegación que permite que las operaciones de aeronaves tomen cualquier trayectoria bien dentro de la cobertura de las ayudas a la navegación

Especificación de Navegación	Fase de vuelo							
	Crucero oceánico	Crucero continental	Llegada	Aproximación				Salida
				Inicial	Intermedia	Final	Frustrada	
RNAV 10	10							
RNAV 5		5	5					
RNAV 2		2	2					2
RNAV 1		1	1	1	1		1	1
RNP 4	4							
RNP 2	2	2						
RNP 1			1	1	1		1	1
Advanced RNP (A-RNP)	2	2 o 1	0.3	0.3	0.3		1	0.3
RNP APCH				1	1	0.3	1	
RNP AR APCH				1-0.1	1-0.1	0.3-0.1	1-0.1	1-0.3
RNP 0.3		0.3	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3

Tabla 2: Especificaciones de navegación y sus asociadas precisiones laterales para cada fase de vuelo (NM) [10]

referenciadas a estaciones o dentro de los límites de la capacidad de las ayudas autónomas, o en una combinación de éstas [1]. Ésto proporciona mayor flexibilidad y eficacia operativa, eliminando las clásicas restricciones donde las aeronaves debían sobrevolar las radioayudas.

Dentro de los sistemas RNAV se encuentran desde sistemas basados en un sensor hasta sistemas con múltiples tipos de sensores de navegación. Aun teniendo en cuenta la gran variedad y los distintos grados de complejidad que pueden tener los sistemas RNAV, las funciones básicas de todos ellos son comunes, e incluyen: navegación, gestión de los planes de vuelo, guía y control, y visualización y control de sistemas [1].

3.1.1.2. RNP

El concepto RNP se define como un sistema RNAV cuyas funcionalidades incluyen, además, la monitorización del rendimiento y la alerta. Éstas funcionalidades adicionales pueden ser proporcionadas de diversas maneras dependiendo de cada sistema.

De acuerdo con el Documento 9613 de la OACI [1], los procedimientos de aproximación final, en los que se centra este documento, pueden ser de los tipos RNP APCH o *Required Navigation Performance Authorization Required Approach* (RNP AR APCH). No obstante, las operaciones que permiten el acceso a mínimos designados como *Localizer Performance* (LP) y LPV basadas en sistemas aumentados GNSS y que no necesitan de autorizaciones especiales se clasifican como un tipo de RNP APCH. Los requisitos mínimos de los procedimientos basados en ambas están descritos en el Anexo 10 de la OACI [12] y resumidos en la Tabla 3 del presente documento. En el caso que se va a analizar, LPV-200, los criterios que se aplican son los de una aproximación de

Operaciones ordinarias	Precisión horizontal 95 %	Precisión vertical 95 %	Integridad	Tiempo de alerta	Continuidad	Disponibilidad
Aproximación de no precisión (NPA)	220 m	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 a 0.99999
Aproximación con guía vertical (APV-I)	16.0 m	20.0 m	$1 - 2 \times 10^{-7}$	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0.99 a 0.99999
Aproximación con guía vertical (APV-II)	16.0 m	8.0 m	$1 - 2 \times 10^{-7}$	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0.99 a 0.99999
Aproximación de precisión de Categoría I	16.0 m	6.0 m to 4.0 m	$1 - 2 \times 10^{-7}$	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ por 15 s	0.99 a 0.99999

Tabla 3: Requisitos para los distintos tipos de aproximaciones [12]

precisión de Categoría I. Los servicios *Ground-Based Augmentation System* (GBAS) de aproximación que pretendan realizar operaciones de Categoría II ó III, necesitan requisitos adicionales que no están contenidos en esta Tabla. Dichos requisitos incluyen niveles de protección y riesgo de integridad de las instalaciones en tierra menores, así como una monitorización de la información más estricta. Esto se consigue, entre otros, con mayor redundancia de los subsistemas, o técnicas de corrección de los errores ionosféricos e interferencias [13].

3.1.2. Infraestructura de ayudas a la navegación

La infraestructura de ayudas a la navegación contiene a las ayudas de navegación que pueden ser a su vez terrestres o espaciales, como los *VHF Omnidirectional Radio Range* (VOR) o los elementos GNSS, respectivamente [1]. Éste componente proporciona información que el sistema utiliza para estimar la posición con el objetivo de alcanzar el rendimiento requerido por las especificaciones de navegación [11].

3.1.3. Aplicación de navegación

La aplicación de navegación es la aplicación de una especificación de navegación y de la infraestructura de ayudas asociada [1]. Este elemento es el que conecta directamente con el concepto de espacio aéreo, como se puede ver en la Figura 6, comprendiendo rutas y procedimientos.

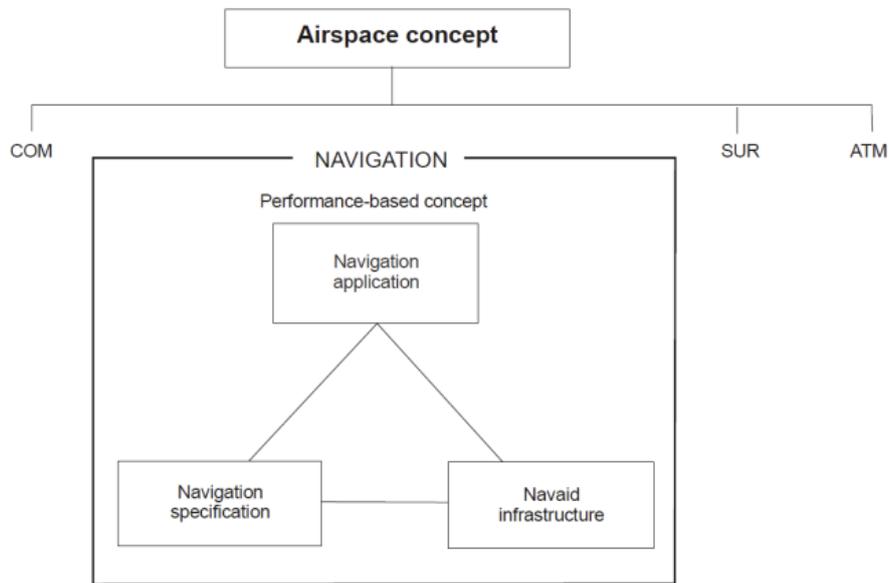


Figura 6: Habilitadores del concepto de espacio aéreo, entre los que se incluye la PBN con sus tres componentes [10]

3.2. PBN como elemento del concepto de espacio aéreo

El concepto de espacio aéreo describe las operaciones que se pretenden llevar a cabo dentro de un espacio aéreo. Estos conceptos se desarrollan para satisfacer unos objetivos estratégicos concretos, que comúnmente son la seguridad, capacidad, eficiencia, medio ambiente y acceso. Éstos, para ser implementados dentro del concepto del espacio aéreo, necesitan de unos habilitadores, que son las comunicaciones, navegación, vigilancia *Air Traffic Services* (ATS), y el *Air Traffic Management* (ATM) [10].

La navegación PBN es, por lo tanto, el habilitador de la navegación en el concepto del espacio aéreo, tal y como se muestra en la Figura 6.

3.3. Parámetros de calidad

Cabe conocer los diferentes parámetros de calidad que se mencionan en la Tabla 3, y que son los que caracterizan el rendimiento de cualquier sistema de navegación [12].

3.3.1. Precisión

La precisión de un sistema de navegación se define como una medida estadística que cuantifica el grado de conformidad entre un parámetro estimado y su valor real. Se presenta como una medida

Operaciones ordinarias	Límite de alerta horizontal	Límite de alerta vertical
Aproximación de no precisión (NPA)	556 m	N/A
Aproximación con guía vertical (APV-I)	40 m	50 m
Aproximación con guía vertical (APV-II)	40 m	20.0 m
Aproximación de precisión de Categoría I	40 m	35.0 m a 10.0 m

Tabla 4: Límites de alerta para distintas aproximaciones [12]

estadística del error con su nivel de seguridad [2]. En el caso que se va a analizar, este nivel de seguridad es el 95 %, como se muestra en la Tabla 3.

3.3.2. Integridad

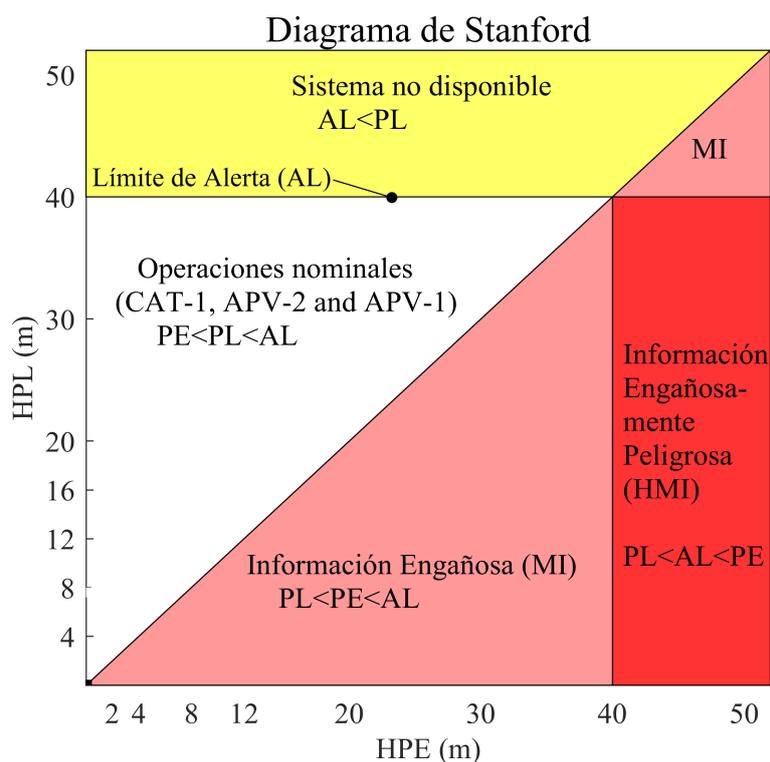
La integridad cuantifica el nivel de confianza depositado en la información que proporciona el sistema de navegación. Por tanto, para que se cumpla la integridad del sistema, éste debe ser capaz de emitir alertas cuando el sistema deba no ser utilizado. Para evaluar este concepto se puede hacer uso de diversos parámetros que reflejan el error máximo tolerable.

En primer lugar, cabe definir el Límite de Alerta o *Alert Limit (AL)*, que determina la tolerancia de error que no debe ser superada sin que se emita una alerta. Éstos límites dependen de cada operación, como se indica en la Tabla 4.

Por otro lado, el Tiempo de Alerta o *Time-To-Alert (TTA)* define el tiempo máximo que puede pasar desde que el sistema de navegación se encuentra fuera de tolerancia hasta que el equipo emite la alerta. De igual modo, este parámetro está incluido en la Tabla 3 y depende también del procedimiento.

Además, el riesgo de integridad mostrado en la Tabla 3 define la probabilidad de que, en cualquier momento, el error de posición exceda el mencionado límite de alerta [14].

En aviación, la magnitud del error, generalmente desconocida, se estima con respecto al riesgo de integridad que se quiere satisfacer. Para ello se utilizan modelos matemáticos que describen la integridad y su riesgo a través del Nivel de Protección o *Protection Level (PL)*. Por lo tanto, se garantiza la integridad (es decir, se mantiene el riesgo de integridad por debajo del nivel máximo aceptable) cuando el nivel de protección es mayor que el Error de Posición o *Position Error (PE)*: $PL > PE$. Si se observa el diagrama de Stanford ejemplificativo de la Figura 7, en el que se grafica el error en el eje X y el nivel de protección en el eje Y, esta condición viene dada por los puntos situados por encima de la diagonal de pendiente unitaria. Cualquier información que permanezca por debajo de dicha diagonal será Información Engañosa o *Misleading Information (MI)*, con especial precaución si el error además supera los límites de alerta, lo que se denominaría un estado de Información Peligrosamente Engañosa o *Hazardously Misleading Information (HMI)* [2].



Sin embargo, si el nivel de protección supera el límite de alerta ($PL > AL$), se activará una alarma en el tiempo requerido para informar que el sistema no está disponible para su operación. Esta condición se puede observar en el diagrama cuando el nivel de protección supera los 40 metros.

Los niveles de protección horizontal y vertical (en el caso de las operaciones con guía vertical) se estiman y modelan de manera independiente. Para una compresión mejorada de los niveles de protección y límites de alerta en aviación se introduce la Figura 8. En el caso de los niveles horizontales, éstos vienen definidos en términos de radio, mientras que los niveles verticales vienen definidos como alturas. Ésto genera un cilindro alrededor de la aeronave, en donde deberá estar contenido el error [14]. De igual modo, el límite de alerta genera un segundo cilindro que deberá contener a su vez el cilindro generado por los niveles de protección. Estas dos condiciones aseguran las condiciones nominales: $PE < PL < AL$.

Por último, se utilizará también el Índice de Seguridad o *Security Index* (SI), que se define como el cociente entre el error de posición y el nivel de protección [14]. Cuando dicho índice se encuentre por encima de 1, la integridad no estará garantizada, situación equivalente en el Diagrama de Stanford a un punto situado por debajo de la diagonal de pendiente unitaria.

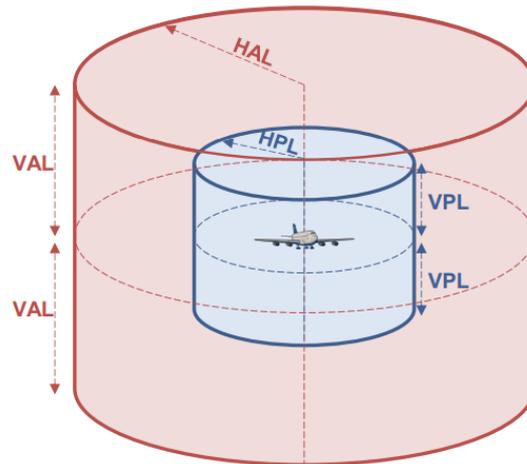


Figura 8: Cilindro de protección de la aeronave [14]

3.3.3. Continuidad

La continuidad es la capacidad del sistema a funcionar correctamente sin interrupciones indeseadas durante un periodo de tiempo. En concreto, la continuidad cuantifica la probabilidad de que el sistema especificado tenga el rendimiento deseado durante la duración de la fase de operación deseada, asumiendo para ello que el sistema estaba disponible [2]. Por el contrario, el riesgo de continuidad, que es lo que se especifica en la Tabla 3, describe la probabilidad de que dicho sistema tenga una interrupción en la fase de la operación.

3.3.4. Disponibilidad

Por último, la disponibilidad de un sistema de navegación se define como el porcentaje del tiempo para el que funciona dentro de su área de cobertura bajo ciertas condiciones especificadas [2]. En este caso, las condiciones son que el nivel de protección se encuentre por debajo de los límites de alerta, definidos en la Tabla 4 para cada operación.

Capítulo 4

RNP APCH

La especificación RNP APCH es la que permite los procedimientos de aproximación que no requieren de autorización especial, como se introdujo en el Capítulo 3, y puede brindar acceso a diferentes rangos de requisitos mínimos dependiendo del rendimiento de los sistemas de navegación y la evaluación de las autoridades del espacio aéreo responsables [1]. Los diferentes mínimos incluidos dentro de RNP APCH pueden observarse en la Figura 9. En dicha Figura se observa que las aproximaciones están divididas en dos secciones: aproximaciones de no precisión o *Non Precision Approach* (NPA), que incluyen *Lateral Navigation* (LNAV) y LP, y las de precisión *Precision Approach* (PA), que incluyen *Lateral Navigation with Vertical Navigation* (LNAV/VNAV) y LPV. Se debe tener en cuenta que, aunque en las operaciones LP y LPV se hable de su habilitación con un sistema de aumentación basado en satélite o *Space-Based Augmentation System* (SBAS), éstas pueden operarse a través de cualquier sistema GNSS que proporcione rendimiento de acuerdo a la Tabla 3, cuando sea empleado de acuerdo con las especificaciones de navegación [1]. Ésto incluye a los sistemas GBAS.

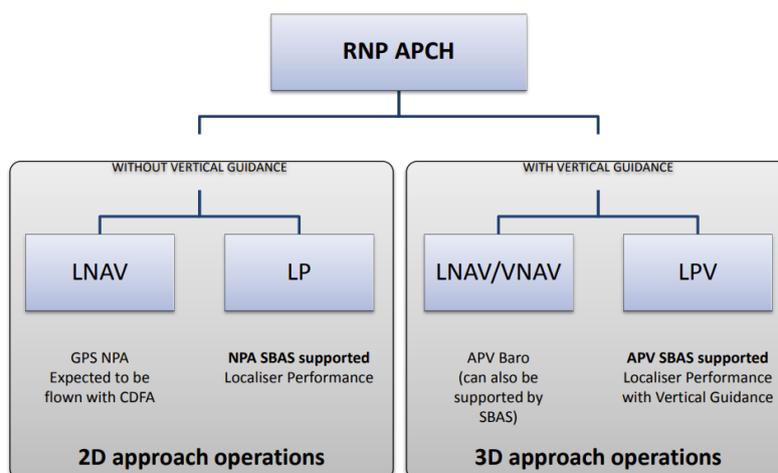


Figura 9: Mínimas de la especificación RNP APCH [14]

4.1. Aproximaciones de no precisión

En primer lugar, las aproximaciones de no precisión o NPA son aquellas que no incluyen guía vertical. También se denominan operaciones 2D, y la OACI y *European Union Aviation Safety Agency* (EASA) esperan que se vuelen como Aproximaciones Finales en Descenso Continuo o *Continuous Descent Final Approach* (CDFA) [15].

Los aterrizajes con aproximaciones 2D verán definidas sus mínimas en términos de visibilidad o rango visual de pista *Runway Visual Range* (RVR), altura/altitud mínima de decisión *Minimum Descent Altitude/Height* (MDA/H), y condiciones de nubes si fuera necesario. Se define por tanto [16]:

- RVR: alcance sobre el cual el piloto de una aeronave en la línea central de una pista puede ver las marcas en la superficie de ésta o las luces que la delimitan o identifican su línea central.
- MDA/H: altura o altitud por debajo de la cual el descenso no se puede realizar sin la requerida referencia visual

4.1.1. LNAV

Dentro de las operaciones de aproximación sin guía vertical se encuentran las operaciones con mínimas LNAV. Éstos son procedimientos de aproximación de no precisión, que proporcionan guía lateral lineal, es decir, basada en mantener la aeronave en una trayectoria recta y constante como se muestra en la Figura 10. Esta guía se proporciona mediante sistemas GNSS, y su integridad, mediante *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM) (ver Sección 5.1) [14].

4.1.2. LP

Las operaciones LP permiten procedimientos de no precisión, sin guía vertical pero con guía angular lateral basada en SBAS, manteniendo la aeronave en una trayectoria específica siguiendo un ángulo de referencia como muestra la Figura 10. La integridad por tanto se garantiza también mediante el sistema de aumentación [14]. La publicación de procedimientos con mínimas LP resulta conveniente cuando motivos de obstáculos o indisponibilidad de SBAS para ofrecer servicio de guía vertical imposibilitan la publicación de procedimientos LPV [17].

4.2. Aproximaciones de precisión

Por otro lado, las aproximaciones de precisión o PA, también denominadas operaciones 3D, utilizan cualquier sistema que permita tener guía horizontal y vertical, ésta última establecida mediante una

ruta de descenso continuo.

En estas aproximaciones los límites se definen en términos de visibilidad y/o rango de pista visual y altitud/altura de decisión *Decision Altitude/Height* (DA/H). Para ello se define en este caso:

- DA/H: altura o altitud para la que una aproximación frustrada debe ser iniciada en el caso en el que la referencia visual necesaria para continuar la maniobra no se establezca.

4.2.1. LNAV/VNAV

En el caso de LNAV/VNAV, éstas ofrecen aproximaciones con guía vertical, por lo que son operaciones en tres dimensiones. Si bien la guía lateral es lineal y basada en GNSS, la guía lineal vertical está basada en BaroVNAV aunque también puede proveerse mediante SBAS si las autoridades aprueban su uso. La integridad en este caso viene dada por RAIM [14].

Las aproximaciones basadas en navegación vertical barométrica se denominan APV Baro-VNAV.

4.2.2. LPV

Las aproximaciones LPV son también en tres dimensiones, proveyendo guía vertical. Las guías lateral y verticales son en ambos casos angulares y basadas en sistemas SBAS. De igual modo, la integridad vendrá monitorizada por el sistema de aumentación [14].

El segmento de aproximación final LPV se codifica especialmente en un bloque de datos dentro de la base de datos de navegación a bordo y se denomina *Final Approach Segment Data Block* (FAS DB) [14]. La información contenida en este bloque se encuentra protegida con alta integridad.

Dentro de estas operaciones se incluyen las aproximaciones APV-I, APV-II y LPV-200. En este contexto, las operaciones *Approach with Vertical Guidance* (APV), se denominarán de tipo A y tendrán altura mínima de decisión por encima de 75 metros o 250 pies. Por otro lado, las operaciones de tipo B tendrán altura de decisión por debajo de 250 pies y se denominan de tipo B. Dentro de estas se definen [16]:

- Categoría I: altura de decisión de hasta 200 pies y con visibilidad no menor a 800 metros o rango de visibilidad de pista no menor a 550 metros.
- Categoría II: altura de decisión menor de 200 pies y no menor de 100 pies, y rango de visibilidad de pista no menor a 300 metros
- Categoría III: altura de decisión menor de 100 pies o sin altura de decisión, y un rango de visibilidad de pista menor a 300 metros o sin limitaciones.

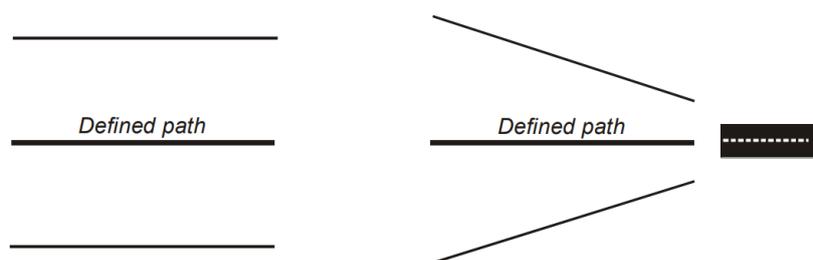


Figura 10: Diferencia entre la guía lateral lineal y angular, mostradas respectivamente de izquierda a derecha [1]

Es por ello que las aproximaciones LPV-200 son de Categoría I, ya que se indica así la altura mínima de decisión. Esta nomenclatura da pie a que las aproximaciones de Categoría II obtengan denominación LPV-100.

4.2.2.1. Marco de implementación LPV

Las aproximaciones LPV, en su mayoría operadas por SBAS, se llevan a cabo en Europa mediante el sistema de aumentación EGNOS y su servicio *Safety-of-Life* (SoL). La implementación de estas aproximaciones debe cumplir con un marco regulatorio establecido por el *Single European Sky* (SES) [18].

El SES es un paquete legislativo de regulaciones que cubren la provisión de los servicios de navegación aérea, así como la organización y el uso del espacio aéreo. Como indica su nombre, el objetivo de este marco es establecer un “cielo único europeo” que garantice el uso óptimo del espacio aéreo europeo para satisfacer las necesidades de todos los usuarios [18].

Desde su creación en 2004, este marco legislativo ha sido suplementado por un enfoque integrado enfocado en la seguridad y con la colaboración de conjuntos empresariales como *Single European Sky ATM Research Joint Undertaking* (SESAR JU) [19], que se desarrolla en la sección 7.3. El documento principal es el Reglamento (CE) n° 549/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de marzo de 2004, por el que se fija el marco para la creación del cielo único europeo. Sucesivas modificaciones han sido incorporadas al texto original, por lo que esta versión consolidada tiene principalmente valor documental [18].

Capítulo 5

Sistemas de Aumentación

Debido a que los sistemas GNSS actuales no cumplen los requisitos necesarios para ser utilizados en operaciones críticas de vuelo como las aproximaciones de precisión, los sistemas de aumentación son una solución que permiten un rendimiento mejorado de los mismos. Esta llamada “aumentación” refiere la provisión de información adicional que mejora el rendimiento de las señales de posicionamiento, navegación y temporización basadas en el espacio, consiguiendo así una mejora de los criterios de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, y además con monitorización independiente de la integridad y capacidad de alerta [2]. En este sentido, y como ya se introdujo en el Capítulo 2, un sistema de aumentación se puede entender como un sistema diferencial que cuenta con información de integridad. Mediante el uso de sistemas aumentados, las señales GNSS pueden ser utilizadas en operaciones críticas tales como aproximaciones de precisión, permitiendo incluso sistemas de aterrizaje con maniobras curvas [2].

Dentro de los sistemas de aumentación existen sistemas basados en tierra, espacio, y en la propia aeronave.

5.1. ABAS

El *Airborne-Based Augmentation System* (ABAS) complementa y/o integra la información GNSS con la información disponible a bordo de la aeronave para mejorar el rendimiento de las constelaciones principales de satélites [20]. Muchos estados han adoptado este sistema como el primer paso hacia una navegación basada en GNSS sin incurrir en un elevado coste, ya que no requiere de infraestructura. No obstante, a diferencia de los sistemas GBAS y SBAS, ABAS no proporciona correcciones que mejoren la precisión de posicionamiento [14].

Dentro del sistema ABAS se incluyen varios esquemas, entre los que se encuentra la monitorización de la integridad de la solución de posición utilizando información redundante, es decir, mediciones de rango múltiples. La monitorización de la integridad tiene dos funciones principales: la detección

de fallos o *Fault Detection*, y la detección y exclusión de fallos o *Fault Detection and Exclusion* (FDE) [12].

En primer lugar, el objetivo de la detección de fallos es detectar la presencia de un fallo de posicionamiento. Mediante el análisis de las mediciones, esta técnica es capaz de detectar señales defectuosas y alertar al piloto. Posteriormente, la exclusión de fallos podrá excluir al satélite de señal defectuosa de la solución, de manera que la navegación pueda continuar sin interrupción [20].

La monitorización mencionada de la integridad se puede realizar tanto utilizando exclusivamente información GNSS, como utilizando información de los sensores de a bordo. Esto determinará si el sistema es un sistema RAIM o *Aircraft Autonomous Integrity Monitoring* (AAIM), respectivamente.

Además de la monitorización de la integridad, los sistemas ABAS incluyen técnicas de ayuda a la continuidad y disponibilidad mediante el uso de fuentes alternativas como relojes externos y altimetría barométrica, así como ayuda a la continuidad mediante la estimación de errores restantes en determinados rangos. La información adicional que no es relativa a los sistemas GNSS podrá ser integrada con la información GNSS en el propio algoritmo de la solución o externamente, para verificar la consistencia de la solución GNSS [12].

5.2. GBAS

El sistema de aumentación basado en tierra fue concebido para cumplir con los requisitos especialmente estrictos de la aviación. Se trata de un sistema local, lo que significa que su cobertura se limita al aeropuerto en el que se implemente [2].

Dentro de los sistemas GBAS, el sistema de aumentación de área local *Local-Based Augmentation System* (LAAS) se presenta como una posible materialización del mismo, y permite alcanzar mínimas que corresponden a las aproximaciones de precisión de Categorías I, II y III, en un radio de hasta 45 km [2]. Éste es un factor diferencial con respecto a los sistemas SBAS, que sólo permiten aproximaciones de hasta Categoría I.

El principio de funcionamiento de este sistema se basa en el cálculo de correcciones diferenciales mediante una red de estaciones terrestres, de coordenadas conocidas, que usan un mínimo de tres receptores. Estas estaciones de referencia realizan mediciones de rango de todas las fuentes disponibles (satélites GNSS, señales SBAS, señales de pseudolites, ...), y posteriormente, el centro de control en tierra compara las distancias estimadas con las reales, determinando el error medio en las mediciones que servirán como correcciones [21]. Además de las correcciones diferenciales, el centro de control también monitoriza la integridad de las señales. Centros de monitorización externa monitorizan a su vez la funcionalidad del sistema completo [2].

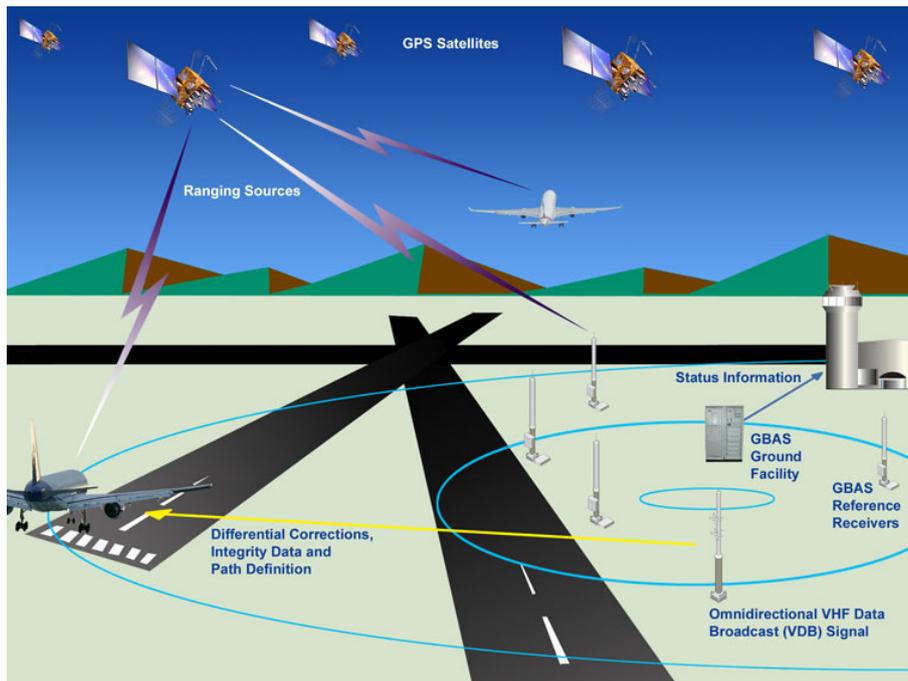


Figura 11: Arquitectura del sistema GBAS [21]

La información de aumentación se transmite en un formato estandarizado al receptor, como por ejemplo el RTCM SC-104, mediante un enlace seguro a través de una antena transmisora omnidireccional *VHF Data Broadcast* (VDB) [21]. Este enlace se encuentra en una banda de radio protegida (108-117.975 MHz), banda de *Very High Frequency* (VHF) dedicada en exclusiva para la navegación aérea. La precisión que se puede alcanzar con este sistema se encuentra por debajo del metro para el percentil 95, y el nivel de integridad puede alcanzar hasta 10^{-7} por cada 150 segundos según la *Federal Aviation Administration* (FAA) [2]. Un esquema de la arquitectura ya descrita se muestra en la Figura 11 con todos los elementos mencionados.

5.3. SBAS

El sistema SBAS es el sistema de aumentación basado en el espacio. Su principio de funcionamiento concurre en el uso de una red de estaciones terrestres que monitorizan señales satelitales, haciendo mediciones GNSS. Estas observaciones se envían a través de una red de área amplia a las instalaciones de procesamiento, en donde estaciones maestras utilizan las mediciones para generar parámetros de corrección para las órbitas y relojes de los satélites, así como para la influencia ionosférica. Si bien los sistemas SBAS no tienen posibilidad de reducir los errores relacionados con el multipath o los efectos troposféricos, las estaciones maestras realizan comprobaciones de integridad para validar las señales satelitales [2].

El sistema SBAS proporciona tres componentes principales de información que mejoran el rendi-

miento [2]:

- Por un lado, las correcciones aumentan la precisión de la solución de posición.
- Además, las señales similares a las del GPS procedentes de los satélites geoestacionarios SBAS aumentan la disponibilidad y la continuidad, pero también la precisión de la solución de posición.
- En último lugar, la información sobre la integridad de las señales SBAS mejoran la seguridad al alertar a los usuarios en un plazo de 6 segundos de cualquier fallo en el GNSS, pero también en la funcionalidad del SBAS.

5.3.1. Mensaje e información SBAS

La información contenida en un mensaje SBAS contiene efemérides y almanaque de los satélites, correcciones rápidas y lentas, información de integridad, información sobre las correcciones ionosféricas, información de sincronización, y datos diversos a nivel de servicios. Cada mensaje tiene 250 bits y se transmite a 250 bits por segundo. Los sistemas SBAS cuentan con 64 tipos de mensajes distintos, aunque algunos de ellos están reservados para uso futuro [22]. Los tipos de mensaje que se pueden recibir mediante un dichero SBAS están resumidos en la Tabla 5. Especial relevancia toma el mensaje tipo 0, ya que es el que permite distinguir tres tipos de operaciones distintas.

- Modo de prueba: el mensaje tipo 0 se transmite con ceros, indicando por tanto que la señal no es apta para ser utilizable
- Modo no *Safety-of-life*: el mensaje tipo 0 se transmite, pero con la misma información que el mensaje tipo 2, indicando así que el sistema se encuentra en fase de prueba pero puede ser utilizado para aplicaciones que no sean críticas o correspondan con servicios *Safety-of-life*.
- Modo *Safety-of-life*: el mensaje tipo 0 no se transmite, transmitiendo nominalmente el mensaje tipo 2.

La codificación de la información en formato RINEX se detalla en la Sección 8.2.

5.3.2. Los diferentes sistemas SBAS

Si bien los sistemas SBAS tienen carácter regional, el gran número de sistemas SBAS operativos y en desarrollo permiten anticipar que los servicios SBAS proveerán una cobertura casi mundial en los próximos años [23]. Entre los sistemas actualmente operativos se encuentran el *Wide Area*

Ámbito	Tipo de mensaje (MT)	Contenido
Información de satélite	1	Asignaciones de máscara PRN
	2-5	Correcciones rápidas
	6	Información de integridad
	7	Factor de degradación de corrección rápida
	9	Mensaje de navegación Geoestacionario (GEO)
	17	Almanaques de satélites GEO
	24	Correcciones rápidas mixtas / correcciones lentas de errores de satélite
	25	Correcciones lentas de errores de satélite
Efectos ionosféricos	28	Mensaje de matriz de covarianza de efemérides de reloj
	18	Máscara de puntos de la red ionosférica (IGP)
Otros mensajes	26	Correcciones de retardo ionosférico
	0	Pruebas SBAS
	10	Parámetros de degradación
	12	Parámetros de tiempo de red SBAS / compensación de UTC
	27	Mensaje de servicio SBAS
	62	Pruebas internas SBAS
	63	Nulo

Tabla 5: Tipos de mensajes SBAS [22]

Augmentation System (WAAS) de Estados Unidos, el *Multi-functional Transport Satellite Based Augmentation System* (MSAS) de Japón, el *GPS Aided GEO Augmented Navigation* (GAGAN) de India, y el EGNOS de Europa que se desarrollará con mayor nivel de detalle en el Capítulo 6. La Figura 12 muestra la disponibilidad de los cuatro sistemas SBAS operativos a Junio de 2019, en donde se pueden identificar los diferentes sistemas por su localización geográfica.

La ya mencionada potencial cobertura de carácter mundial viene dada por la interoperabilidad de los sistemas, que está garantizada por medio de estándares internacionales. Todos los sistemas SBAS han sido desarrollados siguiendo los estándares y prácticas recomendadas o *Standards and Recommended Practices* (SARPS), y los fabricantes deben garantizar por su parte el cumplimiento con los *Minimum Operational Performance Standards* (MOPS) [23].

Por otro lado, los sistemas que se encuentran en desarrollo incluyen al sistema *BeiDou Satellite Based Augmentation System* (BDSBAS), *Korean Augmentation Satellite System* (KASS), *Augmented Navigation for Africa* (ANGA), *Southern Positioning Augmentation Network* (SouthPAN) y *System of Differential Correction and Monitoring* (SDCM).

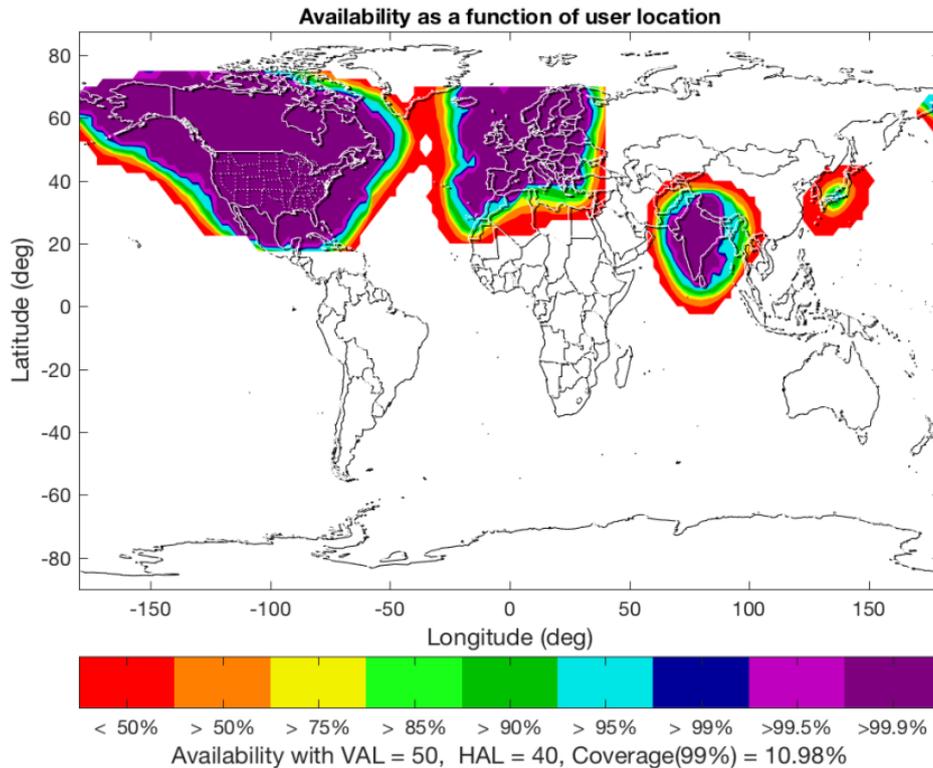


Figura 12: Disponibilidad de procedimientos APV/LPV, a Junio 2019 [23]

5.3.2.1. WAAS

El sistema SBAS apareció por primera vez con la implementación del WAAS de Estados Unidos, que fue desarrollado por la FAA y se encuentra en estado operativo desde Julio de 2003 [23]. El área de cobertura de este sistema está centrado en América del Norte [24]. El sistema apoya operaciones en crucero, llegada y aproximaciones, teniendo la capacidad de soportar mínimas LPV-200.

La infraestructura del sistema WAAS cuenta con 38 estaciones de referencia y 3 estaciones maestras, que son las que determinan las correcciones y la información de integridad, que posteriormente es transmitida a los 3 satélites geostacionarios a través de 6 estaciones de subida de datos [25].

A 2 de febrero de 2023, un total de 4114 procedimientos LPV están operativos en 1995 aeropuertos, junto con 736 procedimientos LP en 538 aeropuertos [26].

5.3.2.2. MSAS

Continuando de manera cronológica, fue en 2007 cuando el sistema MSAS empezó a estar operativo, sirviendo principalmente a Japón [24].

A fecha de 2023, el uso del sistema MSAS está limitado a su uso desde la fase de ruta hasta

aproximaciones de no-precisión, es decir, sin guía vertical. No obstante, en 2018 se acordó la intención de implementar aproximaciones LPV [27].

5.3.2.3. GAGAN

Por su parte, GAGAN, comenzó a estar operativo en 2013 para procedimientos RNP 0.1, sirviendo al espacio aéreo indio [24]. Posteriormente, en 2015 recibió la certificación para ser utilizado en aproximaciones APV-1 [28]. En consecuencia, el sistema apoya operaciones de crucero, llegada y aproximaciones de precisión.

5.3.2.4. Otros sistemas en desarrollo

- BDSBAS: Este sistema, que aumentará las señales de Beidou, está siendo desarrollado por China y tiene planeado apoyar operaciones desde crucero hasta la aproximación. Cuenta con tres satélites geoestacionarios en órbita, 27 estaciones de monitorización, 2 centros de procesamiento, 1 centro de control de operaciones y 3 estaciones de subida de datos completamente desplegados [29].
- KASS: El KASS es el sistema de aumentación desarrollado por Corea y que planea apoyar operaciones desde crucero hasta aproximación con mínimas de APV-I [29]. El programa comenzó a desarrollarse en octubre de 2014 y lanzó su primer satélite geoestacionario en junio de 2022. Su objetivo es proveer servicio de *Safety of Life* a comienzos de 2024 [30].
- ANGA: El ANGA se encuentra en desarrollo con planes para apoyar operaciones desde crucero hasta aproximaciones LPV-200 en un área que incluye 18 estados africanos y 16 millones de kilómetros cuadrados, que planea ser potencialmente ampliada hasta dar cobertura al continente. Desde septiembre de 2020 este sistema ofrece servicios SBAS pre-operacionales. El objetivo es ofrecer operatividad a partir de 2025[29].
- SouthPAN: Del mismo modo, el SouthPAN es un sistema desarrollado por Australia y Nueva Zelanda que planea ofrecer servicios desde crucero hasta LPV-200. Desde septiembre de 2022 ofrece acceso temprano al *Open Service*, y su objetivo es certificar el *Safety of Life* para 2028 [31].
- SDCM: El SDCM de Rusia se encuentra en desarrollo para proporcionar aproximaciones con guía vertical APV-I [29].
- Programa EGNOS en África: Un futuro potencial sistema de aumentación podría partir como iniciativa de EGNOS de proveer servicios en el continente Europeo, más allá del área que proporcionaría el sistema ANGA [29].

5.4. Beneficios de SBAS y comparación con GBAS

Como se ha comentado a lo largo del capítulo, los sistemas que ofrecen mejoras en cuanto a la precisión de navegación son tanto los sistemas GBAS como los SBAS. Por tanto, es importante hacer un resumen de sus similitudes y diferencias.

A nivel operacional, al comparar SBAS con GBAS, hay que tener en cuenta que el primero ofrece una cobertura de mayor extensión al tratarse de un sistema regional y no local. La aumentación basada en satélite permite además tener un sistema que no es dependiente de la instalación o mantenimiento de infraestructuras terrestres en el lugar donde se deseen llevar a cabo dichas maniobras.

En lo que respecta a las aerolíneas, la amplia cobertura de SBAS permite a las aerolíneas utilizar este método como sistema de navegación principal en ruta, obteniendo la monitorización de la integridad sin la necesidad de RAIM. Además, nuevas rutas aéreas no dependientes de ayudas en tierra proporcionarían rutas más eficientes [24]. Esta navegación en crucero no se puede obtener con GBAS debido a su reducida cobertura.

En lo que respecta a las aproximaciones, sí es cierto que ambas permiten aproximaciones LPV. En el caso de SBAS, las mínimas que se pueden obtener son aquellas equivalentes a un ILS de Categoría I, pero conseguido de manera más económica por la ya mencionada independencia de ayudas construidas en tierra [23]. En el caso de GBAS, este sistema es capaz de ofrecer aproximaciones con mínimas potenciales de hasta Categoría III, si bien hasta ahora sólo se han implementado en aeropuertos mínimas de hasta Categoría II como se explica en la Sección 7.2. Por tanto, si bien en ambos casos se desbloquean nuevos caminos de aproximación, permitiendo potencialmente reducir el impacto ambiental y acústico en zonas pobladas, los sistemas GBAS ofrecerán operaciones de mayor precisión con la desventaja de una mayor inversión económica de los aeropuertos.

Se puede concluir que, si se desea implementar una aproximación LPV de Categoría I, como la LPV-200 de la Parte II, el proceso de implementación y validación puede ser más sencillo utilizando SBAS, como EGNOS en Europa. EGNOS proporciona un marco establecido, datos históricos y servicios que facilitan la toma de datos y el cumplimiento de estándares específicos. La relativa facilidad en la implementación de sistemas basados en EGNOS o en el sistema WAAS se evidencia al comparar los procedimientos publicados por los sistemas SBAS y GBAS. En general, se ha observado que el número de procedimientos publicados por SBAS es significativamente mayor que los publicados por GBAS, como se detallará en el Capítulo 7. Esto sugiere que existe una mayor experiencia y disponibilidad de recursos relacionados con los procedimientos basados en SBAS, lo cual puede agilizar el proceso de desarrollo y aprobación de estas aproximaciones.

Capítulo 6

EGNOS: el sistemas SBAS europeo

EGNOS es el sistema de aumentación basado en satélite de Europa. Como cualquiera de estos sistemas, se utiliza para mejorar el rendimiento de los sistemas GNSS tradicionales, utilizando para ello mediciones de estaciones de referencia cuya posición es conocida con precisión. Dichas estaciones, llamadas *Range Integrity Monitoring Station* (RIMS), están distribuidas por Europa y el Norte de África, como se puede ver en la Figura 13. A notar, la localización exacta de dichas estaciones no se encuentra publicada por motivos de seguridad. Las mediciones de las estaciones se transmiten a un centro de computaciones central, donde se calculan las correcciones diferenciales y mensajes de integridad, que son retransmitidas sobre el área de cobertura mediante satélites geoestacionarios [22].

Actualmente, EGNOS provee correcciones para la señal GPS L1, de uso civil, proporcionando correcciones e información de integridad para los satélites GPS, así como información que permite al usuario estimar el retraso de las señales. Las versiones futuras de EGNOS ofrecerán además correcciones que permitirán aumentar también a la constelación GNSS europea, Galileo, incorporando para ello la frecuencia L5 [32].

6.1. Servicios

El sistema de aumentación EGNOS provee tres servicios: *Open Service* (OS), SoL y *EGNOS Data Access Service* (EDAS).

6.1.1. Open Service

El Servicio Abierto fue lanzado el 1 de octubre de 2009 con el objetivo mejorar la precisión de las señales GPS mediante la corrección de diferentes fuentes de error que afectan a estas señales. Dichas fuentes de error son principalmente el estado del reloj, la posición de los satélites, y los

efectos ionosféricos, aunque también puede avisar de señales GPS con información errónea o engañosa. OS es gratuito y accesible para cualquier usuario que disponga de los equipos compatibles con GPS y SBAS, no siendo necesaria ninguna otra certificación [32].

6.1.2. Safety of Life

El Safety of Life fue lanzado el 2 de marzo de 2011 con el objetivo de mejorar las operaciones de aviación civil, si bien éste puede ser usado por cualquier aplicación de transporte en donde las vidas de sus usuarios puedan verse en peligro si el rendimiento del sistema de navegación se degrada por debajo de unos mínimos y el sistema no es capaz de alertarlo [32]. Este servicio se provee abierta y gratuitamente, pero las operaciones de navegación que se basen en él requieren de una autorización específica concedida por la autoridad competente [33]. Además, los países dentro de la Unión Europea, así como dentro de los territorios EEA y EFTA, basarán su marco regulador en el del SES [32], como ya se explicó en la Sección 4.2.2.1.

6.1.3. EDAS

El tercer servicio EDAS ofrece a usuarios autorizados acceso a los datos en tiempo real de EGNOS, así como también a su archivo histórico. Este servicio ha estado disponible desde el 26 de julio de 2012.



Figura 13: Estaciones RIMS de EGNOS [34]

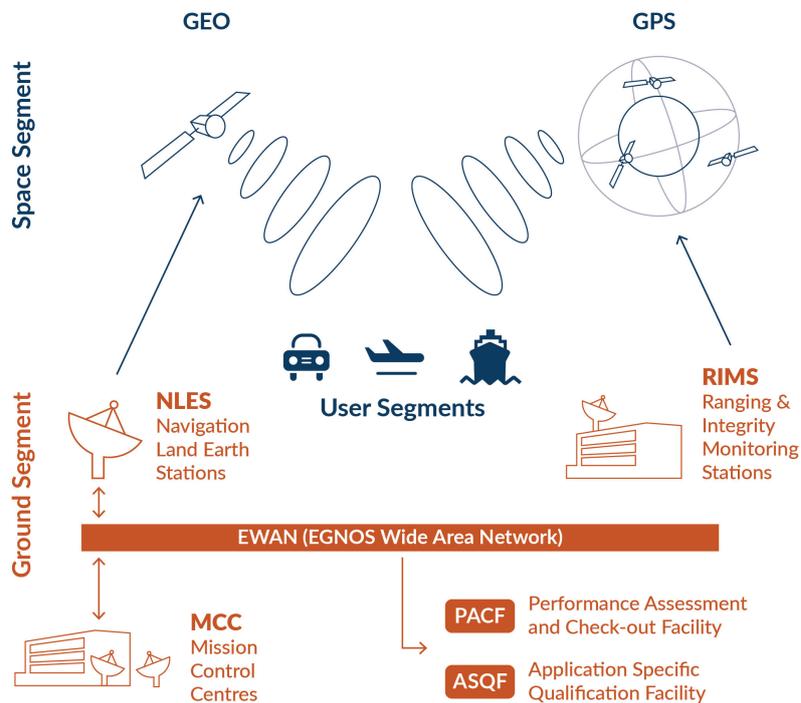


Figura 14: Esquema de la arquitectura de EGNOS [22]

6.2. Arquitectura

En cuanto a lo que arquitectura se refiere, el servicio de EGNOS cuenta con dos segmentos principales, que son el segmento de tierra y de espacio, tal y como se muestra en la Figura 14. Esta arquitectura se completa con los segmentos de soporte y de usuario.

6.2.1. Segmento del espacio

El segmento del espacio de EGNOS incluye a 3 satélites geostacionarios, que son los que transmiten las correcciones y la información de integridad para los satélites GPS. La configuración de este segmento ofrece un alto nivel de redundancia, ya que está diseñado para que el fallo de uno de estos satélites no afecte a la cobertura del servicio, asegurando un alto nivel de continuidad. Los parámetros orbitales de los satélites son susceptibles a cambios a lo largo del tiempo, aunque se realizan de forma que no afecten a la continuidad o rendimiento del servicio [32]. Los satélites geostacionarios utilizados, desde el 26 de marzo de 2020 y a fecha de abril de 2023, junto con sus parámetros orbitales, se encuentran descritos en la Tabla 6.

Satélite GEO	PRN	Longitud Geográfica	Estado
ASTRA-5B	PRN 123	31.5°E	Operativo
ASTRA SES-5	PRN 136	5°E	Operativo
INMARSAT 4F2 EMEA	PRN 126	64°E	En prueba

Tabla 6: Satélites GEO de EGNOS [35]

6.2.2. Segmento de tierra

El segmento de tierra comprende la red de estaciones RIMS; 2 Centros de Control de Misión o *Mission Control Center* (MCC), que contienen a su vez una *Central Processing Facility* (CPF) y *Central Control Facility* (CCF); 2 Estaciones Terrestres de Navegación o *Navigation Land Earth Stations* (NLES) por cada satélite geostacionario; y la Red de Área Amplia de EGNOS o *EGNOS Wide Area Network* (EWAN), que es la red que comunica todos los anteriores componentes entre sí [32].

- RIMS: su función se centra en realizar mediciones desde satélites GPS, y transmitir esos datos crudos, cada segundo, a las centrales que procesan los datos en los centros de control. La red cuenta actualmente con un total de 37 estaciones RIMS, desde que se dieran de baja en 2023 las RIMS de Abu Simbel (ABS) y Alexandria (ALY) en Egipto [34].
- CPF: se encuentran dentro de los MCC, y se encargan de recibir los datos de las estaciones RIMS para calcular correcciones para los relojes y órbitas de los satélites, y elaborar un modelo de errores ionosféricos. Estas tres correcciones se retransmiten a los usuarios para mejorar la precisión de la solución de posición. Además, estos centros estiman los errores residuales que reciben los usuarios tras aplicar las correcciones EGNOS. Estos errores residuales están caracterizados por los parámetros *User Differential Range Error* (UDRE) y *Grid Ionospheric Vertical Error* (GIVE), que estiman los errores debido al reloj y órbitas, y a la ionosfera, respectivamente. Por último, en estas instalaciones también se realizan diversas funciones que monitorizan la integridad y que se emiten en el servicio de SoL.
- NLES: Las antenas NLES son las que transmiten a los satélites geostacionarios los mensajes elaborados por los CPF. La existencia de dos NLES por satélite geostacionario se debe a redundancia, ya que sólo uno se encuentra activo en cada momento.
- CCF: El sistema EGNOS es controlado a través de un centro de control, presente en cada MCC. Estas instalaciones permiten asegurar el monitorización y control del servicio de manera permanente.

6.2.3. Segmento de soporte

Además, tal y como se muestra en la Figura 14, existen dos instalaciones adicionales que apoyan las operaciones del sistema, como lo son Instalación de Evaluación y Verificación del Rendimiento o *Performance Assessment and Check-out Facility* (PACF) y la Instalación de Calificación Específica de Aplicaciones o *Application Specific Qualification Facility* (ASQF). Ambas instalaciones son operadas por el proveedor de servicios de EGNOS [22].

- PACF: La Instalación de Evaluación y Verificación del Rendimiento ofrece soporte a EGNOS en forma de análisis de rendimiento, solucionando problemas o mediante procedimientos operacionales, mejorando también las especificaciones y validaciones y proveyendo mantenimiento.
- ASQF: La Instalación de Calificación Específica de Aplicaciones provee las herramientas que permiten validar y certificar las aplicaciones de EGNOS a las autoridades aeronáuticas y de aviación civil.

6.2.4. Segmento de usuario

En cuanto al segmento de usuario, éste comprende a todos los receptores EGNOS que permiten a los usuarios calcular con precisión sus posiciones con integridad. Actualmente, los receptores de EGNOS son compatibles con aplicaciones de agricultura, aviación o marítimas, entre otras muchas [22].

6.3. Limitaciones

Tal y como describe EGNOS en su documentación, en la mayoría de los casos el servicio SoL, que es en el que se utiliza en aviación, estará disponible por encima de los mínimos de rendimiento requeridos. No obstante, existen situaciones en las que los usuarios pueden experimentar niveles de rendimiento anormalmente bajos. En este contexto, EGNOS encuentra limitaciones específicas, por ejemplo, cuando las señales EGNOS están atenuadas o bloqueadas por obstáculos, o cuando hay efectos multipath o interferencias, pues estos efectos no pueden ser corregidos por las correcciones diferenciales [32]. No obstante, la ionosfera sigue siendo, al igual que en cualquier sistema GNSS y como se ha mencionado en la Sección 2.5, una de las fuentes de error más significativas [2].

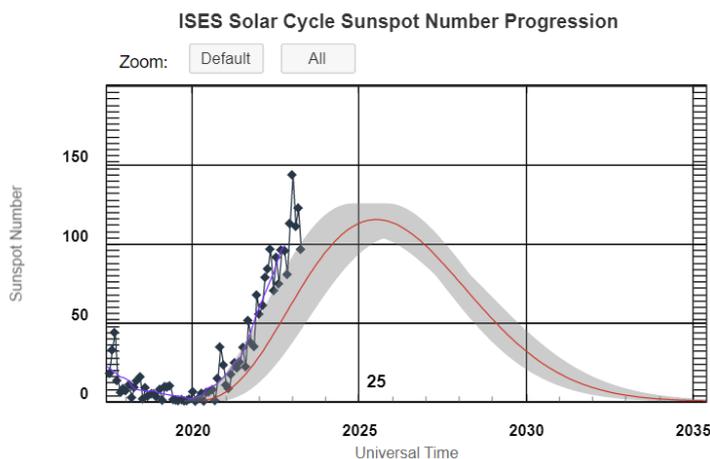


Figura 15: Evolución del número de manchas solares durante el ciclo solar número 25 [36]

6.3.1. Actividad Ionosférica

En general, gran parte de los errores ionosféricos logran ser mitigados mediante las correcciones del sistema EGNOS. No obstante, bajo ciertas circunstancias, un aumento o variación de la actividad solar incrementaría los errores ionosféricos residuales, lo que provocaría una mayor sobreestimación de errores (mayor nivel de protección), y en el caso de que esta sobreestimación supere el límite de alerta, la disponibilidad del servicio para dicha operación se vería afectada. Esto se considera una limitación intrínseca de los sistemas SBAS que utilizan una única frecuencia, como en el caso de EGNOS hasta la fecha [32].

Especial relevancia toman los ciclos solares en este contexto. Los ciclos solares representan los cambios periódicos en la actividad y apariencia del sol y tienen un periodo de aproximadamente 11 años. El número de manchas solares o *sunspots* es uno de los principales parámetros que permiten monitorizar dichos ciclos, ya que un gran número de manchas solares aumenta la frecuencia en la que pueden aparecer erupciones solares espontáneas, con el consiguiente incremento de errores en las soluciones GNSS [2].

El año 2023 se sitúa en mitad del ciclo solar número 25, que comenzó en diciembre de 2019 [36]. El número de manchas solares para el ciclo 25 está representado en la Figura 15, en donde se observa la alta actividad solar durante el mencionado año 2023. De hecho, EGNOS emitió el 4 de mayo de 2023 un aviso de servicio o *Service Notice* en el que se avisa de un rendimiento potencialmente bajo debido al ciclo solar [37]. El impacto en el servicio EGNOS afecta desde 2022 con tendencia creciente a las áreas del norte y sur de Europa respecto a los niveles normales de rendimiento del servicio OS y a la disponibilidad y continuidad del SoL.

La correlación de las erupciones solares con el rendimiento de los servicios de EGNOS resulta evidente cuando se compara la hora de una erupción solar monitorizada con el rendimiento del

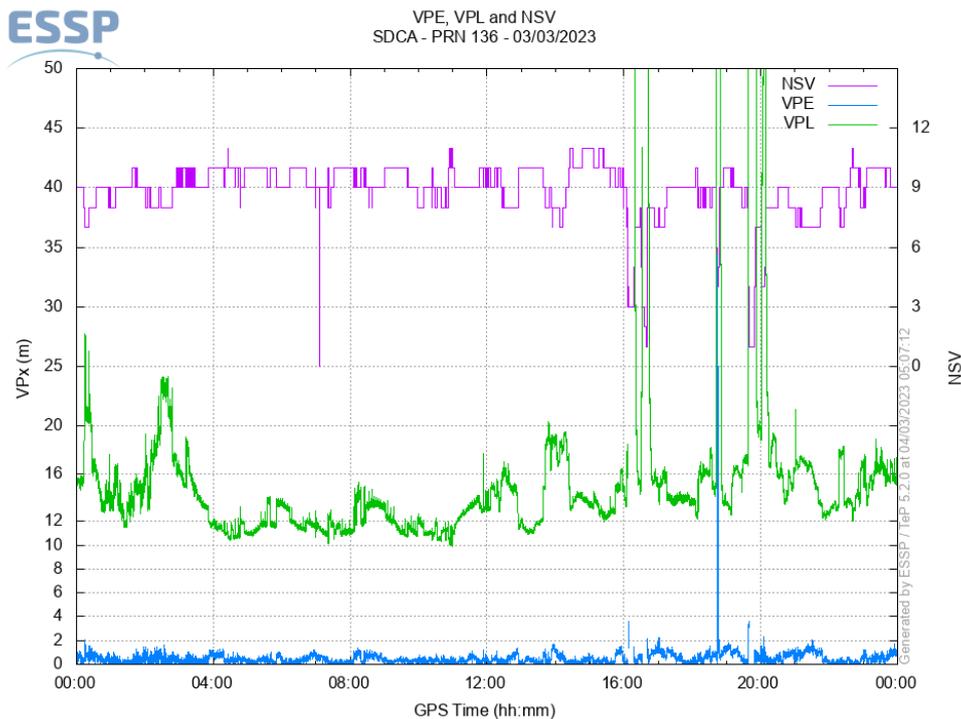


Figura 16: Evolución temporal de los errores y límites de protección durante el 3 de marzo de 2023 [39]

servicio a dicha hora. El observatorio de dinámicas solares de la NASA detectó una fuerte llamarada solar el 3 de marzo de 2023, con pico a las 12:52 pm, hora EST [38]. Si se revisan los datos históricos de rendimiento extraídos de EGNOS en la Figura 16 se puede ver cómo los límites de protección se incrementan, alrededor de la hora equivalente GPS 7:52 pm, hasta niveles que impiden la disponibilidad del servicio [39].

No obstante, se espera que la inclusión de la multifrecuencia en las versiones futuras de EGNOS, como EGNOS V3, mitiguen de manera más robusta los efectos ionosféricos [40].

6.3.2. Atenuación de las señales GPS o EGNOS

Otra limitación de EGNOS es la atenuación de las señales GNSS o EGNOS, ya que tienen niveles de potencia muy bajos. De hecho, las señales GPS sólo pueden ser rastreadas por receptores que conocen las señales que buscan [2]. Por este motivo, una atenuación excesiva de la señal podría resultar en una solución de precisión degradada.

6.3.3. Interferencias: Jamming y Spoofing

Si bien las frecuencias usadas en GPS y EGNOS se encuentran en bandas protegidas, puede ocurrir que se encuentren interferencias, deliberadas o no, que afecten, degraden o incluso falsifiquen a las señales oficiales [32]. En el caso del *Jamming*, interferencias con alta potencia interrumpen y alteran el normal funcionamiento de las señales. En el caso del *Spoofing*, se emiten señales que imitan a las señales GNSS pero con información errónea, por lo que la posición calculada será también errónea [2].

Dependiendo del nivel de interferencia, puede ocurrir una degradación de la solución o incluso una total pérdida del servicio. La detección, mitigación y control de las transmisiones fraudulentas son responsabilidades de las autoridades locales [32].

6.3.4. Cambios en las constelaciones GPS

Por último, puede ocurrir que durante los procesos de modernización de los satélites GPS se produzcan periodos de tiempo en los que su constelación básica no se encuentre disponible [32]. En este escenario el rendimiento del servicio SoL puede verse afectado, obteniendo valores de rendimiento por debajo de los requisitos marcados por la Tabla 3.

Capítulo 7

Evolución histórica de SBAS y GBAS en Europa

7.1. SBAS

El *Safety of Life* de EGNOS entró en servicio el 2 de marzo de 2011 [24]. Sólo unos días después, el 17 de marzo de ese mismo año, se implementó el primer procedimiento de aterrizaje de precisión LPV en Pau Pyrenees, Francia, lo que permitió a los aviones certificados alcanzar una altura de decisión de 254 pies antes de aterrizar [41].

Posteriormente, el siguiente hito fue marcado el 29 de septiembre de 2015, fecha en la que se declaró el servicio LPV-200 en el *EGNOS Service Provision Workshop* de Copenhague. Esto implicaba una mejora en la precisión y permitía reducir la altura de decisión hasta los 200 pies. Este logro se materializó el 28 de abril de 2016 con la publicación del primer procedimiento LPV-200 en el aeropuerto Charles de Gaulle, también en Francia [42].

A fecha de 25 de abril de 2023, hay 930 procedimientos basados en EGNOS operativos en 479 aeropuertos, estando además planteados 483 nuevos [43]. El liderazgo de Francia mostrado en los inicios continúa vigente a día de hoy, ya que es el país que cuenta con más procedimientos, sumando un total de 193, tal y como se puede extraer de la Figura 17.

En cuanto a España, el aeropuerto de Santander fue el primer aeropuerto español que implementó procedimientos basados en EGNOS, autorizando el 17 de octubre de 2013 las aproximaciones LPV en sus dos cabeceras de pista [44]. No fue hasta 2017 cuando se continuó con la publicación de procedimientos basados en EGNOS, esta vez en el aeropuerto de Almería [43].

Los datos actuales indican que, hasta el 25 de abril de 2023, hay 30 procedimientos operativos distribuidos en 16 aeropuertos. Estos datos nos sitúan cerca de la media europea pero significativamente alejados de los países en cabeza, como son Francia, Noruega o Alemania. Además, es el

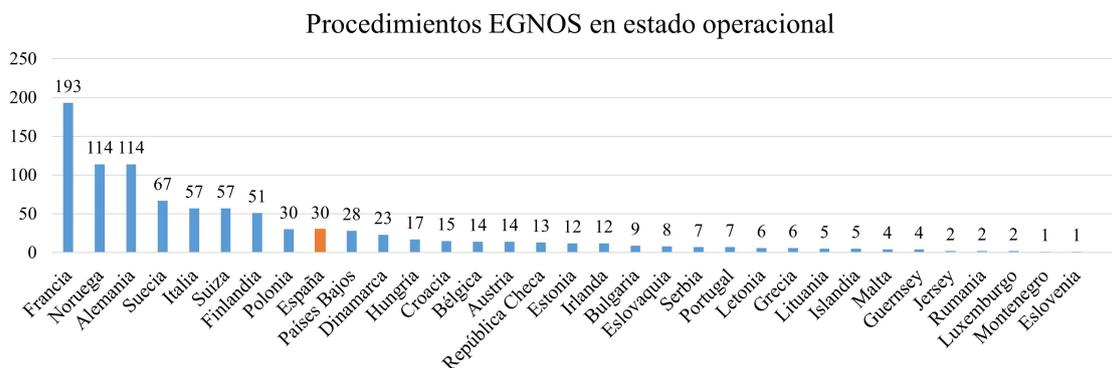


Figura 17: Número de procedimientos EGNOS en estado operacional, a 25 de abril de 2023 [43]

aeropuerto de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat cuenta con el mayor número de procedimientos basados en SBAS, con sus 5 cabeceras de pista disponibles para utilizar este sistema [43].

Un resumen del estado actual de los aeropuertos españoles en relación con los procedimientos SBAS puede observarse en la Tabla 7. En esta tabla se muestra que los procedimientos más recientemente aprobados son dos en el aeropuerto de Burgos y uno en el de Logroño, todos en el mencionado mes de abril de 2023. Además de los procedimientos publicados aprobados, existen planes de implementación para 30 aeropuertos mas, entre los que se incluyen los de Alicante, Sevilla, Gran Canaria, Málaga o Santiago de Compostela.

7.2. GBAS

Actualmente, se estima que más de 100 aeropuertos en todo el mundo cuentan con aproximaciones GBAS de Categoría I [45]. En España, ENAIRE y Aena fueron pioneros al poner en servicio las operaciones de GBAS CAT I en el Aeropuerto de Málaga Costa del Sol en 2014, siendo entonces el segundo aeropuerto en Europa con esta tecnología, y el cuarto en el mundo [46]. Hasta abril de 2023, y de acuerdo con el AIP [47], ningún otro aeropuerto español ha implementado procedimientos GBAS, si bien se está trabajando en una posible futura implementación de sistemas GBAS CAT II y III en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas [46].

El hito más reciente de esta tecnología se materializó en julio de 2022, cuando se publicó el primer procedimiento GBAS CAT II en el aeropuerto de Frankfurt, convirtiéndose en el primer aeropuerto del mundo en ofrecer este servicio [48]. Este logro permite que los aviones puedan hacer aproximaciones al aeropuerto incluso en malas condiciones meteorológicas, con base de nubes de hasta 30 metros y visibilidad de hasta 300 metros.

Estos nuevos procedimientos GBAS CAT II se materializaron en el marco del proyecto SESAR DREAMS [49](*Demonstration of Runway Enhanced Approaches Made with Satellite Navigation*),

Aeropuerto	código OACI	Pista	Estado	Fecha
La Palma	GCLA	36 LPV Z	Operacional	14/07/2022
Lanzarote	GCRR	03 LPV Z	Operacional	23/05/2019
Almería	LEAM	07 LPV Z	Operacional	25/05/2017
Almería	LEAM	25 LPV Z	Operacional	02/02/2017
Burgos	LEBG	04 LPV	Operacional	20/04/2023
Burgos	LEBG	22 LPV	Operacional	20/04/2023
J T Barcelona-El Prat	LEBL	02 LPV200 Z	Operacional	04/11/2021
J T Barcelona-El Prat	LEBL	06L LPV200 Z	Operacional	04/11/2021
J T Barcelona-El Prat	LEBL	06R LPV200 Z	Operacional	04/11/2021
J T Barcelona-El Prat	LEBL	24L LPV200 Z	Operacional	04/11/2021
J T Barcelona-El Prat	LEBL	24R LPV200 Z	Operacional	04/11/2021
Castellón	LECH	24 LPV Z	Operacional	21/04/2022
Lleida	LEDA	13 LPV Z	Operacional	03/11/2022
Girona	LEGE	01 LPV Z	Operacional	24/03/2022
Jerez	LEJR	02 LPV Z	Operacional	02/12/2021
A S Madrid-Barajas	LEMD	18L LPV200 Z	Operacional	23/02/2023
A S Madrid-Barajas	LEMD	18R LPV200 Z	Operacional	23/02/2023
A S Madrid-Barajas	LEMD	32L LPV200 Z	Operacional	23/02/2023
A S Madrid-Barajas	LEMD	32L LPV200 Z	Operacional	23/02/2023
Palma de Mallorca	LEPA	06L LPV200 Z	Operacional	01/03/2018
Palma de Mallorca	LEPA	24L LPV200 Z	Operacional	01/03/2018
Palma de Mallorca	LEPA	24R LPV200 Z	Operacional	01/03/2018
Logroño	LERJ	11 LPV	Operacional	20/04/2023
Reus	LERS	07 LPV Z	Operacional	01/12/2022
Valencia	LEVC	12 LPV Z	Operacional	01/02/2018
Valencia	LEVC	30 LPV Z	Operacional	01/02/2018
Vigo	LEVX	01 LPV Z	Operacional	05/12/2019
Vigo	LEVX	19 LPV Z	Operacional	05/12/2019
Santander	LEXJ	11 LPV Z	Operacional	17/10/2013
Santander	LEXJ	29 LPV Z	Operacional	17/10/2013

Tabla 7: Procedimientos SBAS operacionales en España, a 25 de abril de 2023 [43]

en el que se perseguía el objetivo de llevar las operaciones de procedimientos de aproximación mejorados a niveles altos de madurez [50].

7.3. SESAR

En este contexto europeo, cabe destacar el papel que desempeña el programa SESAR, que se enmarca dentro del marco regulatorio SES (ver sección 4.2.2.1). El programa SESAR 3 Joint Undertaking es una unión público-privada de empresas que reúne a más de cincuenta organizaciones del sector aeronáutico, incluyendo Eurocontrol. Su objetivo es acelerar e implementar el *Digital European Sky* a través de la investigación e innovación [51].

El mencionado *Digital European Sky* utiliza tecnologías avanzadas conocidas como “soluciones SESAR” para aumentar la conectividad y la automatización en la gestión del tráfico aéreo. Otro objetivo de la organización es virtualizar su infraestructura y proporcionar servicios de tráfico aéreo en todo tipo de espacios aéreos, incluyendo operaciones en altitudes muy bajas y muy altas. La implementación de estas tecnologías daría lugar a un sistema más escalable, ágil y resistente a los cambios en la demanda del tráfico aéreo o a cualquier perturbación. Se persigue por tanto la modernización del espacio aéreo europeo hacia un paradigma más sostenible y optimizado [51].

Para lograr la implementación del *Digital European Sky*, el programa SESAR se basa en una metodología de innovación que consta de cuatro áreas principales: investigación exploratoria, investigación industrial y validación, innovación acelerada y asimilación, y demostraciones a gran escala [52].

El programa SESAR tiene en su catálogo de soluciones diversos productos relacionados con los sistemas de navegación por satélite y de aumentación. Productos ya desplegados como “Enhanced terminal operations with RNP transition to LPV”, que define transiciones de RNP a LPV para mejorar las operaciones terminales, ya se han implementado en varios países [52]. Otras “soluciones SESAR” sin embargo se encuentran todavía en desarrollo. Un ejemplo es “Improved approach procedures into secondary airports in low-visibility conditions”, que busca reducir la altura de decisión mediante el desarrollo y validación de capacidades de navegación aérea que permitan aproximaciones hasta mínimos LPV-100/CAT II, basándose para ello en sistemas SBAS [53].

Queda claro pues el compromiso de las instituciones europeas con el desarrollo de la industria y, en concreto, con la intención de extender el uso de la navegación basada en satélites.

Capítulo 8

Formato RINEX

Para poder procesar los datos que permitan determinar los parámetros de calidad, éstos deben ser introducidos en el software Pegasus con formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), como se explica en la Sección 10 enfocada en la metodología. Este formato fue desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berne para facilitar el intercambio de datos GPS, ya que se percataron de que el procesado de datos GPS no necesitaba la mayoría de la información que se almacenaba en los receptores, sino que resultaba suficiente con los datos de las observaciones de código, fase y tiempo, además de algunos datos relacionados con la estación. En la actualidad, RINEX es el formato más comúnmente utilizado, por lo que la mayoría de fabricantes de receptores disponen de software que convierten su propio formato a RINEX [2].

El formato RINEX distingue siete tipos de ficheros diferentes en las versiones de RINEX 2 [54], y tres tipos en las versiones de RINEX 3, si bien éste soporta más constelaciones [55]. Las Tablas 8 y 9 muestran los ficheros de cada formato junto con su extensión. En este documento se profundiza solamente en los archivos de navegación y observación GPS, y SBAS, ya que son los tres tipos de ficheros que se van a emplear de manera práctica en la validación del procedimiento LPV-200. Si bien los archivos de navegación y observación pueden estar en cualquiera de estos dos formatos, los archivos SBAS son sólo soportados por RINEX 2.

Archivo RINEX	Extensión
Datos de Observación	.yyO
Mensaje de Navegación GPS	.yyN
Datos Meteorológicos	.yyM
Mensaje de Navegación GLONASS	.yyG
Mensaje de Navegación GEO	.yyH
Datos de Reloj de Satélite y Receptor	.yyC
Datos SBAS	.yyB

Tabla 8: Tipos de archivos en RINEX 2 [54]

Archivo RINEX	Constelación	Extensión
Datos de Observación	GPS	_GO.rnx
	GLONASS	_RO.rnx
	Galileo	_EO.rnx
	QZSS	_JO.rnx
	BDS	_CO.rnx
	IRNSS	_IO.rnx
	SBAS	_SO.rnx
	Mixtas	_MO.rnx
Datos de navegación	GPS	_GN.rnx
	GLONASS	_RN.rnx
	Galileo	_EN.rnx
	QZSS	_JN.rnx
	BDS	_CN.rnx
	IRNSS	_IN.rnx
	SBAS	_SN.rnx
Todas las constelaciones	_MN.rnx	
Datos meteorológicos		_MM.rnx

Tabla 9: Tipos de archivos en RINEX 3 [55]

8.1. Nomenclatura

Cuando se trata de intercambiar archivos en formato RINEX, es importante seguir una recomendación específica para nombrarlos. Es crucial comprender esta nomenclatura y su significado para poder descargar los datos deseados de manera eficiente. Aunque el tipo de archivo es el indicador principal, otros campos en el nombre también proporcionan información relevante. Sin embargo, esta recomendación varía dependiendo de si se trata de un archivo en formato RINEX 2 o RINEX 3.

En el caso de los archivos RINEX 2, la nomenclatura sigue el formato mostrado en (5). Adicionalmente, una compresión puede estar añadida. La más común es la compresión UNIX, indicada en la nomenclatura por una extensión extra “.Z”.

$$ssssddf.yyt \tag{5}$$

Dentro de (5) [54], los elementos se definen como:

- ssss: nombre de la estación definido con cuatro caracteres
- ddd: día del año del primer registro de datos
- f: número de secuencia/caracter dentro del día

- f=0: archivo diario
- f=a: primera hora; f=b: segunda hora; ...
- yy: año expresado con dos dígitos
- t: tipo de archivo (ver Tabla 8)

En el caso de los ficheros con formato RINEX 3, la nomenclatura recomendada es la dada por (6).

$$XXXXMRCCC_S_YYYYDDDHHMM_PPU_FFU_CT.fmt \quad (6)$$

Esta nomenclatura es mucho más extensa y detallada, y sus elementos vienen definidos, resumidamente, por [55] :

- XXXXMRCCC: estación o nombre del proyecto
- S: información de la fuente de los datos
- YYYYDDDHHMM: época inicial
- PPU: periodo del archivo y unidad del periodo
- FFU: frecuencia de los datos en los archivos de observación
- CT: tipos de datos contenidos (ver Tabla 9)
- fmt: formato de los datos contenidos
 - fmt=rnx: RINEX
 - fmt=crx: compresión Hatanaka

Adicionalmente, una extensión extra indicando el tipo de compresión puede estar añadida. La compresión vendría indicada por una extensión extra “.gz”.

8.2. Archivos SBAS (RINEX 2)

Al abrir un fichero SBAS en formato RINEX 2, se identifica un encabezado en primer lugar, seguido de la información. La Figura 18 muestra un extracto de un fichero SBAS en RINEX 2, que se ha utilizado para ilustrar el formato de estos archivos, y que corresponde además a un archivo utilizado en el proceso de validación.

En la Tabla 10 se desglosa la información contenida en el encabezado. Se puede observar que éste contiene principalmente datos que identifican al archivo, como el nombre del programa que crea

```

    2.10          B SBAS DATA          RINEX VERSION / TYPE
EDAS           ESSP                    09-04-23 2359    PGM / RUN BY / DATE
                                                    COMMENT
                                                    END OF HEADER

136 23 04 10 00 00 0.0 L1 32 0 SBA
26   53 69 0C 22 E0 E7 06 B8 2D FF DF FE FF F7 89 B4 2C E1
17 07 B0 35 C1 4F FE FF F7 80 29 3E 4F 00
    
```

Figura 18: Ejemplo de encabezado e información en un fichero SBAS [56]

Etiqueta de encabezado	Descripción	Ejemplo Figura 18
RINEX VERSION / TYPE	Formato de versión	2.10
	Tipo de archivo	B SBAS DATA
PGM / RUN BY / DATE	Nombre del programa creando el fichero	EDAS
	Nombre de la agencia creando el fichero	ESSP
	Fecha de creación del fichero	09-04-23 2359
COMMENT*	Comentarios	-
REC INDEX / TYPE / VERS*	Índice del receptor	-
	Tipo de receptor	-
	Versión del rcvr	-
END OF HEADER	Última línea del encabezado	-

Nota: Los campos con * son opcionales.

Tabla 10: Formato de la información de un fichero SBAS en formato RINEX 2 [54]

el fichero o su fecha de creación. Por otra parte, la Tabla 11, muestra un desglose de la información contenida en los registros. Además de datos como el PRN o la época, lo más importante a destacar es el registro del mensaje SBAS. En este caso en concreto, se puede observar un mensaje de tipo 26, que según se vio en la Tabla 5, contiene información de los efectos ionosféricos.

8.3. Archivos de Navegación (RINEX 3)

Los ficheros de navegación contienen los datos de navegación o datos de efemérides expresados como números de punto flotante. Esta información permite conocer la ubicación de los satélites.

Los encabezados de estos archivos son genéricos independientemente del sistema satelital. Entre la información contenida se pueden observar los segundos que diferencian el tiempo UTC del tiempo GPS (*leap seconds*), o coeficientes que modelan las correcciones ionosféricas y correcciones del reloj del satélite.

De igual modo, el mensaje es también similar entre sistemas. Como se ilustra en la Figura 19 el

Registro	Descripción	Ejemplo Figura 18
PRN / EPOCH / RCVR	Número identificador PRN	136
	Época del bloque de datos	23 04 10 00 00 0.0
	Banda	L1
	Longitud del mensaje (bytes)	32
	Índice interno del receptor en el archivo	0
	Identificador del sistema de transmisión	SBA
DATA RECORD-1	Identificador del marco de mensaje (Tabla 5)	26
	Primeros 18 bytes de mensaje en hexadecimal	53 69 0C 22 E0 E7 06 B8 2D FF DF FE FF F7 89 B4 2C E1
DATA RECORD-2	Bytes restantes de los mensajes en hexadecimal	17 07 B0 35 C1 4F FE FF F7 80 29 3E 4F 00

Tabla 11: Formato de la información de un fichero SBAS en formato RINEX 2 [54]

primer registro de datos contiene el sistema de satélites (GPS) junto con el número de satélite, la época e información de su reloj. Los seis registros siguientes contienen diferentes parámetros, entre los que se incluyen los elementos Keplerianos que definen la órbita, el tiempo de referencia, así como otros factores y coeficientes para otros modelos de corrección y banderas de los satélites [55].

8.4. Archivos de Observación (RINEX 3)

Los archivos de observación contienen las mediciones de rango realizadas por el receptor para cada satélite. Al combinar esta información con la información que proporciona el mensaje de navegación (ubicación de los satélites), el receptor es capaz de plantear las ecuaciones de posición y, de esta manera, determinar su propia ubicación.

Los encabezados de estos ficheros, tal y como se muestra en la Figura 20, incluyen información fácil de interpretar habiendo explicado ya los tipos de ficheros anteriores, como la versión de RINEX, el tipo de fichero, el nombre de la estación y sus coordenadas aproximadas o la época de la primera y última observación. No obstante, cabe destacar las líneas que definen los tipos de observables presentes en el fichero. Estas líneas vienen dadas por la etiqueta de registro “SYS / # / OBS TYPES”. RINEX 3 soporta observables para diferentes constelaciones, por lo que éstas están diferenciadas. Las constelaciones más comunes y que aparecen en el fichero incluyen: GPS (G), Galileo (E), y GLONASS (R). En la mencionada línea se incluyen también los tipos de observables para cada una de ellas [55].

```

3.04          N: GNSS NAV DATA    G: GPS          RINEX VERSION / TYPE
Mdb2Rinex 5.6.29X          20230410 010616 UTC PGM / RUN BY / DATE
GPSA  2.6077D-08  1.4901D-08 -1.1921D-07 -5.9605D-08  IONOSPHERIC CORR
GPSB  1.2902D+05  1.6384D+04 -2.6214D+05  3.2768D+05  IONOSPHERIC CORR
GPUT  9.3132257462D-10-8.881784197D-16 319488 2257  TIME SYSTEM CORR
      18      18  1929      7          LEAP SECONDS
                                          END OF HEADER
G01 2023 04 10 00 00 00 00 1.946962438524D-04-3.410605131648D-12 0.000000000000D+00
      8.500000000000D+01-1.310937500000D+02 3.821587934993D-09-2.912813334939D+00
      -6.834045052528D-06 1.267880247906D-02 7.517635822296D-06 5.153652851105D+03
      8.640000000000D+04 1.192092895508D-07-3.136833194448D+00-2.291053533554D-07
      9.900582946220D-01 2.478125000000D+02 9.470926466446D-01-7.637461330035D-09
      -1.775073976695D-10 1.000000000000D+00 2.257000000000D+03 0.000000000000D+00
      2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 4.656612873077D-09 8.500000000000D+01
      7.914000000000D+04

```

Figura 19: Extracto de un fichero de navegación [57]

Analizando ahora la información contenida, se puede observar que cada registro de observación comienza con el símbolo “>”. La Figura 21 muestra un extracto de los registros de información del fichero de observación, en donde solo se muestra un satélite. El satélite mostrado corresponde al G04 y tiene presentes las 12 observaciones de GPS definidas en el encabezado. La información de los observables se repite para cada satélite, pero ha sido omitida para una mejor visualización. La Tabla 12 muestra el desglose de la información presente en la Figura 21.

```

3.04 OBSERVATION DATA M: MIXED RINEX VERSION / TYPE
Mdb2Rinex 5.6.29X 20230410 010616 UTC PGM / RUN BY / DATE
gfzrnrx-1.15-8044 HEADER EDIT 20230410 010617 UTC COMMENT
SNTG MARKER NAME
19409M001 MARKER NUMBER
IGN-E OBSERVER / AGENCY
1830228 LEICA GR25 4.02/6.713 REC # / TYPE / VERS
725569 LEIAR25.R4 LEIT ANT # / TYPE
0.0606 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
4628811.7260 -696053.0610 4318397.5600 APPROX POSITION XYZ
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1-9] COMMENT
LX: < 12dBHz -> 1; 12-17dBHz -> 2; 18-23dBHz -> 3 COMMENT
24-29dBHz -> 4; 30-35dBHz -> 5; 36-41dBHz -> 6 COMMENT
42-47dBHz -> 7; 48-53dBHz -> 8; >= 54dBHz -> 9 COMMENT
G 12 C1C L1C D1C S1C C2W L2W D2W S2W C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
R 8 C1C L1C D1C S1C C2P L2P D2P S2P SYS / # / OBS TYPES
E 16 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q C7Q L7Q D7Q S7Q C8Q SYS / # / OBS TYPES
L8Q D8Q S8Q SYS / # / OBS TYPES
DBHZ SIGNAL STRENGTH UNIT
1.000 INTERVAL
2023 4 10 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2023 4 10 23 59 59.0000000 GPS TIME OF LAST OBS
0 RCV CLOCK OFFS APPL
24 R01 1 R02 -4 R03 5 R04 6 R05 1 R06 -4 R07 5 R08 6 GLONASS SLOT / FRQ #
R09 -2 R10 -7 R11 0 R12 -1 R13 -2 R14 -7 R15 0 R16 -1 GLONASS SLOT / FRQ #
R17 4 R18 -3 R19 3 R20 2 R21 4 R22 -3 R23 3 R24 2 GLONASS SLOT / FRQ #
C1C -71.940 C1P -71.940 C2C -71.940 C2P -71.940 GLONASS COD/PHS/BIS
18 18 1929 7 LEAP SECONDS
END OF HEADER

```

Figura 20: Encabezado de un fichero de observación [57]

```

> 2023 04 10 00 00 0.0000000 0 25
G04 23773109.440 124928940.75707 -3154.199 44.050
23773106.800 97347384.16406 -2457.820 40.050
23773110.740 93291207.46608 -2355.511 48.100

```

Figura 21: Extracto de la información contenida en un fichero de observación [57]

Registro	Descripción	Ejemplo Figura 21
EPOCH	Identificador de registro	>
	Época	2023 04 10 00 00 0.0
	Flag de época	0
	Número de satélites observados	25
	Desfase del reloj receptor [s]	-
OBSERVATION RECORD	Número de satélite	G04
	C1C	23773109.440
	L1C	124928940.75707
	D1C	-3154.199
	S1C	44.050
	C2W	23773106.800
	L2W	97347384.16406
	D2W	-2457.820
	S2W	40.050
	C5Q	23773110.740
	L5Q	93291207.46608
	D5Q	-2355.511
	S5Q	48.100

Tabla 12: Descripción del extracto de información del fichero de observación para el satélite G04

Parte II

Proceso de Validación

Capítulo 9

Validación: parte del proceso de diseño

Los métodos que se utilizan en navegación aérea para garantizar que sus sistemas cumplan con los estándares y requisitos establecidos vienen definidos en el Documento 9906 de la OACI, que establece el control o garantía de la calidad (*Quality Assurance*) para la publicación de un procedimiento de vuelo instrumental o *Instrumental Flight Procedure* (IFP). Dicho control de calidad se lleva a cabo mediante un “proceso IFP”, que incluye a su vez el proceso de adquisición de información, el proceso de diseño del procedimiento, y el de difusión y publicación [58]. Esta estructura del proceso IFP, con sus tres partes principales, puede observarse de manera esquemática en la Figura 22.

Dentro del mencionado proceso de diseño del procedimiento, la validación es el último paso antes de la publicación de los procedimientos. La validación tiene múltiples objetivos, tales como la verificación de obstáculos y los datos de navegación, así como la evaluación de la aeronavegabilidad del procedimiento. Los procedimientos empleados deberán garantizar el cumplimiento de los parámetros de calidad mencionados en la Sección 3.3, llevando a cabo una validación obligatoria en tierra y otra en vuelo [58]. Al completar todos los pasos, se debe generar un informe de validación que incluya todos los datos evaluados.

9.1. Validación en tierra

La OACI establece que la validación en tierra comprende, por un lado, una revisión sistemática de los pasos implicados en el proceso de diseño por una persona experta en la materia, y por otro lado, una validación previa al vuelo [58]. El objetivo de la validación en tierra es detectar errores en la documentación y evaluar preliminarmente en tierra aquellos parámetros que serán evaluados posteriormente en vuelo, en la medida de lo posible [13].

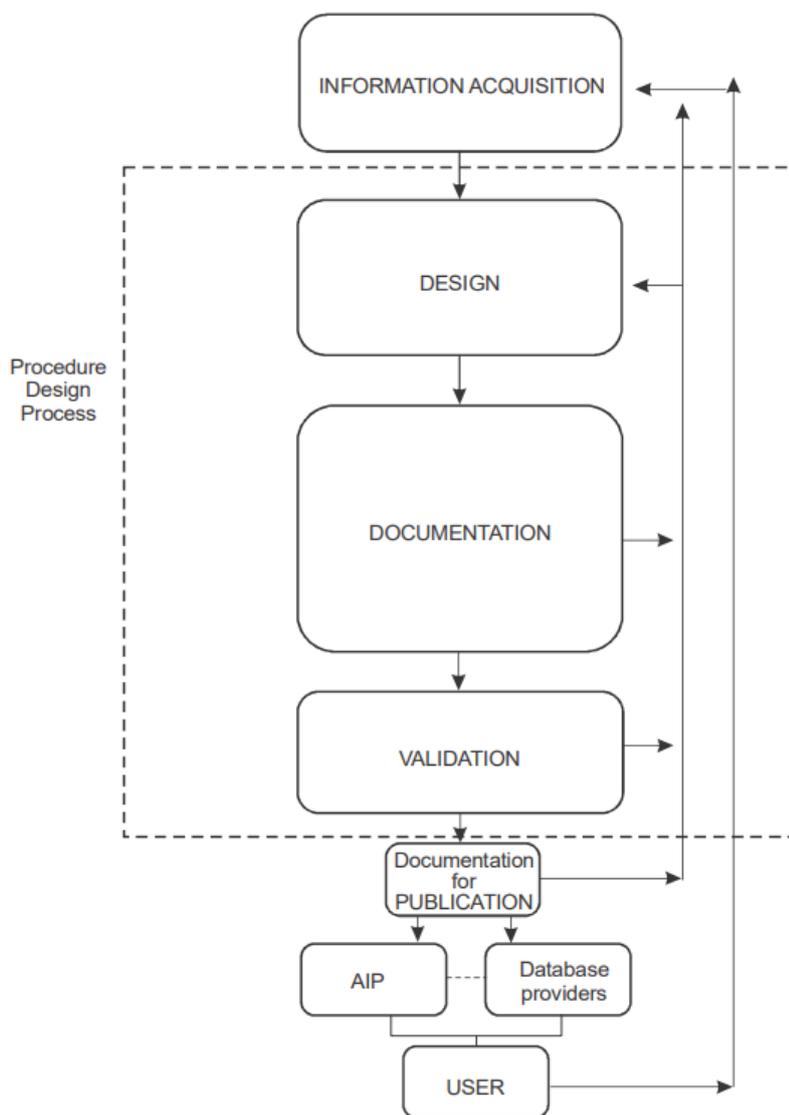


Figura 22: Esquema del proceso IFP [13]

9.1.1. Revisión independiente del diseño IFP

La revisión independiente del diseño IFP implica los siguientes pasos [58]:

- Confirmar la correcta aplicación de los criterios de diseño establecidos por la OACI y su correcta aplicación.
- Confirmar la integridad y precisión de los datos que se han usado
- Verificar las posibles mitigaciones para las desviaciones de los criterios de diseño de los procedimientos
- Verificar que la carta aeronáutica provisional es correcta
- Confirmar la correcta codificación del procedimiento utilizando simulaciones informáticas
- Realizar una evaluación de los obstáculos usando métodos basados en tierra

9.1.2. Validación previa al vuelo

Del mismo modo, la validación previa al vuelo se compone de los siguientes pasos [58]:

- Hacer inventario y revisión del paquete de documentación IFP
- Evaluar información y la codificación de ésta
- Revisar los requisitos especiales de operación y entrenamiento
- Documentar los resultados de la validación previa al vuelo
- Coordinar las limitaciones operaciones para la validación en vuelo

9.2. Validación en vuelo

La validación en vuelo debe realizarse como parte de la certificación inicial y deberá ser incluida también en el programa de garantía de calidad periódico de los estados, para garantizar que el diseño del procedimiento cumple con los requisitos que marca la OACI. Esta validación debe ser realizada por un piloto experimentado aprobado por el estado, que deberá cumplir los objetivos de verificar que los datos de navegación son correctos, evaluar las cartas aeronáuticas y la infraestructura requerida, y conducir un análisis de la aeronavegabilidad para determinar si el procedimiento puede ser operado de manera segura, entre muchos otros aspectos [13].

Esta parte consta de una evaluación en simulador y otra realizada directamente en vuelo. Sin embargo, en ciertos casos donde la precisión y completitud de los obstáculos y datos de navegación

puedan ser verificados adecuadamente mediante una validación en tierra, esta última puede ser suficiente para evitar la necesidad de una validación en vuelo [13].

9.2.1. Evaluación en simulador

La evaluación en simulador se centra en [58]:

- Evaluar la aeronavegabilidad y los problemas debidos a factores humanos
- Documentar los resultados

9.2.2. Evaluación en vuelo

Por último, en esta parte se deberá [58]:

- Verificar los datos
- Evaluar los obstáculos presentes
- Evaluar, al igual que en la simulación, la aeronavegabilidad y los problemas debidos a factores humanos
- Llevar a cabo tareas adicionales de validación
- Verificar la descripción de las cartas aeronáuticas y sus detalles
- Registrar los resultados obtenidos durante la validación en vuelo

9.3. Pegasus

En este contexto, es fundamental disponer de herramientas que agilicen la evaluación de información GNSS, dado que esta forma parte de un proceso de validación extenso y complejo. Pegasus, una herramienta de software, fue diseñada originalmente con el propósito de proporcionar un sistema para evaluar la calidad de las señales SBAS del Banco de Pruebas EGNOS. Con el tiempo, esta herramienta evolucionó y se convirtió en una herramienta utilizada en la validación operativa del sistema EGNOS. Mediante sus diversos módulos, el software permite analizar datos reales recopilados en campañas de recolección de datos, tanto de sistemas SBAS como GBAS [59]. Como se detalla en el Capítulo 10, este software se utiliza en el presente documento para evaluar los parámetros de calidad de la estación ERGNSS que se va a analizar.

Capítulo 10

Metodología

El análisis de los datos que se realiza en esta Parte II se limitará a la evaluación de los parámetros de calidad, estrechamente relacionados con el concepto PBN, dentro del proceso de validación en tierra. Para ello, se han recopilado datos a largo y corto plazo. En consecuencia, el resto de elementos de la validación, como por ejemplo la evaluación de los obstáculos entre muchos otros, han sido omitidos, ya que además no se dispone de un diseño del procedimiento concreto.

10.1. Elección de aeropuertos

A la hora de realizar la validación de una potencial aproximación LPV-200, resulta imprescindible conocer el estado actual de los aeropuertos españoles en lo que respecta a dichos procedimientos, como ya se mostró con la Tabla 7. Para que la validación tenga valor añadido, se ha elegido un aeropuerto sin aproximaciones LPV-200 para poder determinar la idoneidad de una posible incorporación del servicio.

Si se realizara una validación real y vinculante, las mediciones para llevar a cabo el análisis a corto plazo tendrían que llevarse a cabo en los mismos aeropuertos, en los alrededores de la pista. No obstante, en este caso, no se dispone de la capacidad de desplegar receptores GNSS, por lo que se procederá a seleccionar un aeropuerto que cuente con estaciones ERGNSS y RIMS relativamente cercanas. Éste es el caso del aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro.

10.1.1. Aeropuerto de Santiago - Rosalía de Castro

El Aeropuerto cuenta con procedimientos LPV-200 planeados pero no operativos, dispone de la estación ERGNSS SNTG a, aproximadamente, 11.2 km de distancia como se puede calcular de la Tabla 13 y visualizar en la Figura 23, y de la estación RIMS SDC en su misma ciudad, como se puede extraer de la Figura 13.

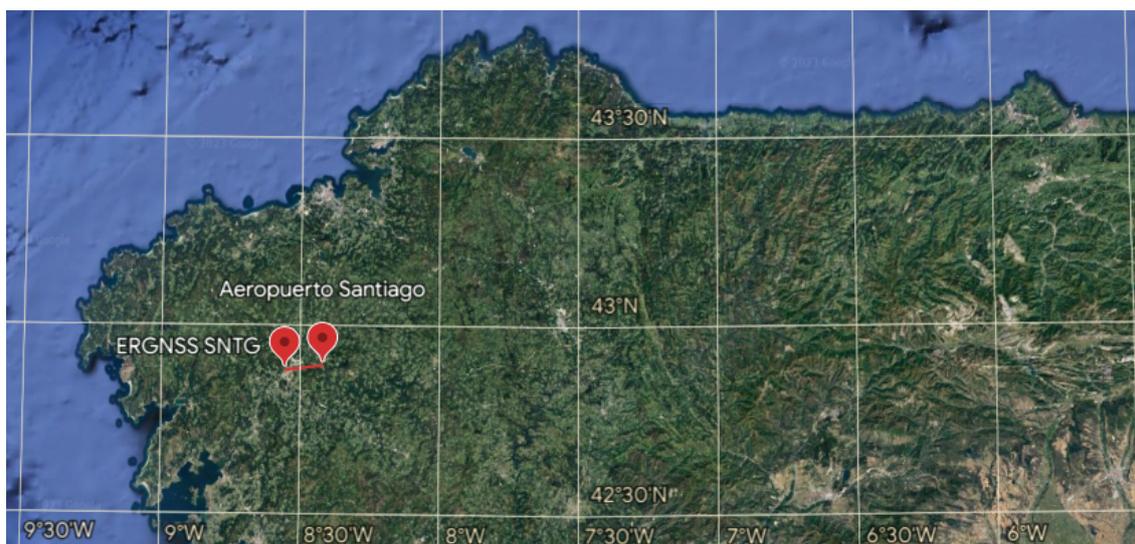


Figura 23: Localización del Aeropuerto de Santiago-Rosalía de Castro y la estación ERGNSS SNTG

Coordenadas ETRS89	Longitud	Latitud	Altitud elipsoidal
ERGNSS SNTG	-8° 33' 06.20307"	42° 53' 07.55440"	312.736 m
ARP Santiago de Compostela	-8° 24' 55"	42° 53' 47"	369 m

Tabla 13: Coordenadas de la estación SNTG [61], y el ARP del Aeropuerto de Santiago [62]

El aeropuerto analizado fue, de entre los aeropuertos españoles, el aeropuerto número 16 en pasajeros y número 19 en operaciones durante 2022 [60]. Con un total de 3 236 619 pasajeros y 25 458 operaciones, comprende el 1.3 % y 1.1 % de los pasajeros y operaciones totales, respectivamente.

En cuanto a su ubicación, la ciudad se encuentra en una zona relativamente montañosa y el aeropuerto está situado en una zona elevada, lo que puede resultar en condiciones de viento que pueden dificultar el aterrizaje de aviones. Además, debido al clima habitualmente lluvioso y nublado de la región de Galicia, es posible que haya problemas de visibilidad y precisión en los sistemas de navegación. Estos factores sugieren que sería beneficioso implementar procedimientos SBAS para mejorar la seguridad y eficiencia del aeropuerto.

10.2. Validación a largo plazo

Al comenzar el proceso de validación de cualquier procedimiento PBN, el primer paso a realizar es el análisis de datos a largo plazo. El objetivo del mismo será verificar el cumplimiento de los requisitos de integridad, disponibilidad, continuidad y precisión, mostrados en la Tabla 3, a lo largo de seis meses. Para ello se han utilizado los seis últimos informes mensuales de la *European Satellite Services Provider* (ESSP) disponibles a abril de 2023, que son los correspondientes a los

meses de octubre, noviembre y diciembre de 2022, y enero, febrero y marzo de 2023.

Comenzando por orden, en el análisis de la precisión se comprobará que los errores vertical y horizontal no sobrepasen los 6 y 16 metros, respectivamente. Del mismo modo, al evaluar la integridad, se verificará que el máximo índice de seguridad no sobrepase 1, lo que indicaría la presencia de información engañosa. Además, la continuidad se evaluará positivamente si su riesgo es menor de 8×10^{-6} .

Cuando se analice la disponibilidad, se deberán analizar dos aspectos por separado. En primer lugar, la disponibilidad *Signal-In-Space* (SIS) de EGNOS se deberá evaluar, y está definida como el porcentaje de tiempo en un mes en el que al menos un satélite geoestacionario retransmite mensaje EGNOS. Por otro lado, la disponibilidad relativa a los términos de la operación de aproximación que se vaya a analizar se deberá estudiar.

Para que el criterio de disponibilidad SIS se cumpla, según las directrices marcadas por la OACI, debe haber siempre un satélite operativo. Por otro lado, la disponibilidad LPV-200 de EGNOS se verificará si el Nivel de Protección está por debajo de los Límites de Alerta para el servicio, es decir, por debajo de 40 y 35 metros para los niveles horizontal y vertical, respectivamente. Esta disponibilidad deberá ser de al menos el 99 %.

10.3. Análisis a corto plazo

El análisis a corto plazo constituye el paso posterior al análisis a largo plazo. La toma de datos debe realizarse en el mismo lugar en el que se pretenda llevar a cabo las operaciones PBN y deberá tener una duración mínima de 36 horas. En este caso, se realizó un estudio de 2 días o 48 horas en la estación ERGNSS SNTG, que es la más cercana a dicho aeropuerto, durante el 10 y 11 de abril de 2023.

10.3.1. Elección de los días a evaluar

La elección de los días a evaluar es relevante en el contexto del ciclo solar que corresponde al año 2023 (ver Sección 6.3.1). Si bien los ciclos solares introducen distorsiones de manera periódica cada 11 años, resultaría irrelevante realizar la validación en unos días de excepcional radiación solar, ya que no se estarían evaluando condiciones nominales.

La disponibilidad y la continuidad del servicio SoL son las más afectadas por los altos niveles de radiación solar, por lo que la preselección de los días se basó en estos aspectos. Las Figuras 24 y 25 muestran, respectivamente, la continuidad combinada del servicio LPV-200 en condiciones nominales a comienzo del ciclo solar 25, y con condiciones de alta actividad ionosférica donde este requisito se ve mermado significativamente.

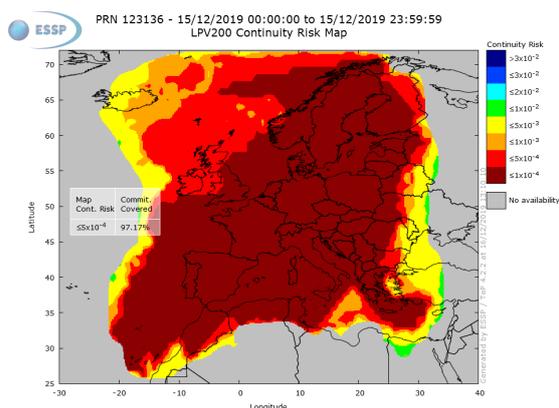


Figura 24: Continuidad en condiciones de baja radiación solar

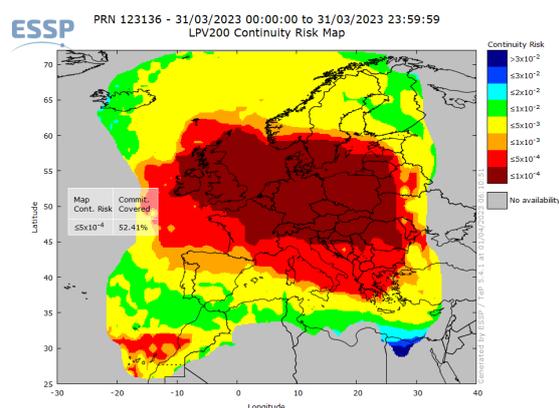


Figura 25: Continuidad en condiciones de alta radiación solar en mitad del ciclo solar 25

Por este motivo, se decidió realizar la validación en el mes de abril, concretamente los días 10 y 11, para los que se esperaba un funcionamiento nominal, en lugar de realizarlo el mes de marzo, donde se puede observar mediante la Figura 25 que se obtuvieron valores de continuidad anormalmente bajos.

10.3.2. Descarga de datos

Para realizar el análisis a corto plazo, datos de distintas fuentes tuvieron que ser recopilados. En primer lugar, se obtuvieron los archivos RINEX de navegación y observación para la estación ERGNSS a analizar de la página de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) [57].

En el caso de los archivos de navegación, se han utilizado los que contienen efemérides GPS, para cada hora. La nomenclatura de estos ficheros sigue el formato definido en la sección 8.3 SNTG00ESP_R_2023100HHMM_01H_GN.rnx, donde HHMM indica la hora y minutos, que van desde 0000 hasta 2300.

En el caso de los archivos de observación, se han utilizado los que contienen observaciones con frecuencia de un segundo, también para cada hora. La nomenclatura en este caso, tal y como se definió en la sección , viene dada por SNTG00ESP_R_2023100HHMM_01H_01S_MO.rnx, donde HHMM indica la hora y minutos de igual manera que en el caso del archivo de navegación.

En consecuencia, para cada día se obtuvieron 24 ficheros de cada tipo. Al realizar la validación durante 2 días, el número de archivos total ascendió a 96. La Figura 26 muestra dos de los ficheros descargados para la validación del día 10 de abril, extraídos del IGN, y en donde se puede observar la nomenclatura de los ficheros.

Para disponer de los archivos SBAS fue necesario solicitar permiso para acceder al ya mencionado servicio EDAS de EGNOS. Una vez concedido el acceso, se pudo descargar un archivo diario que

Observaciones	https://datos-geodesia.ign.es/ERGNSS/horario_1s/20230410/00/SNTG00ESP_R_20231000000_01H_01S_MO.crx.gz
Efemérides GPS	https://datos-geodesia.ign.es/ERGNSS/horario_1s/20230410/00/SNTG00ESP_R_20231000000_01H_GN.rnx.gz

Figura 26: Ficheros de observación y navegación descargados del IGN para el 10 de abril de 2023

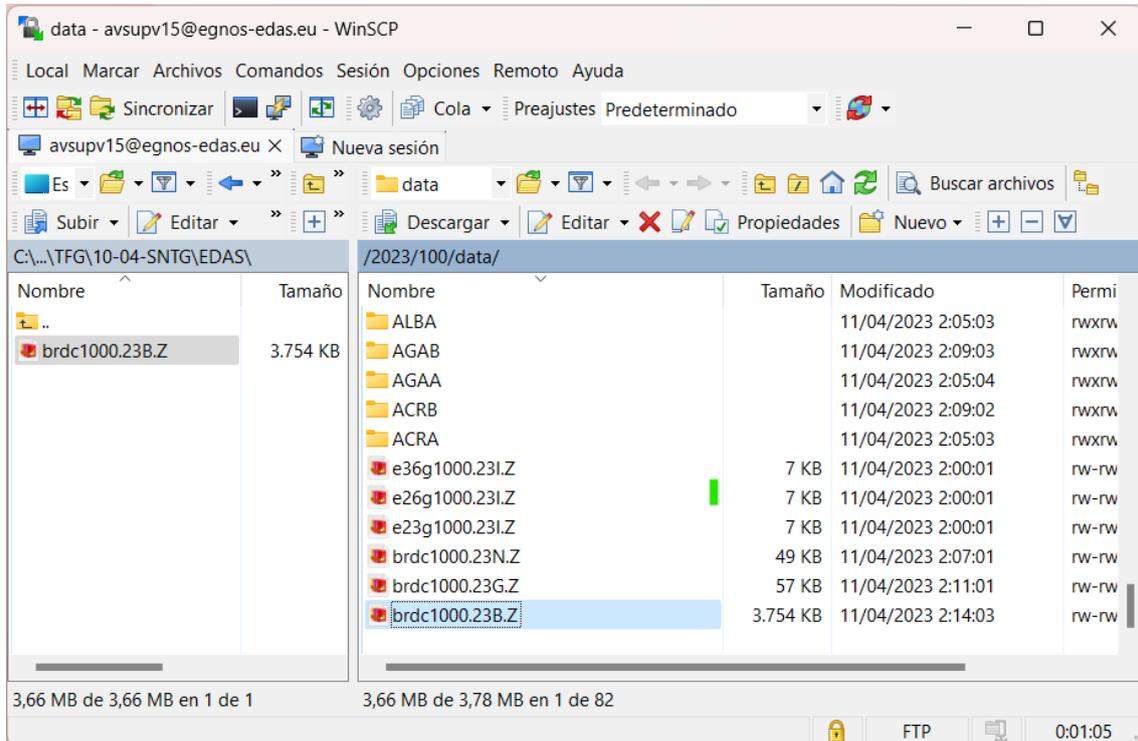


Figura 27: Fichero SBAS descargado del servicio EDAS de EGNOS para del 10 de abril de 2023

contenía las correcciones de las observaciones. Un total de 2 archivos fueron obtenidos. La Figura 27 muestra el archivo SBAS descargado mediante el servicio EDAS para el 10 de abril.

10.3.3. Preproceso de datos

Antes de introducir los ficheros en el software Pegasus se hizo un preproceso de los datos. Por una parte, los archivos descargados del IGN tuvieron que ser descomprimidos con el software Cygwin64. Además, en el caso de los ficheros de observación, la descompresión generaba un archivo en formato “.crx”, que tuvo que ser transformado a “.rnx” mediante el software Hatanaka. El procedimiento que se realizó consistió en colocar todos los ficheros de datos en la carpeta donde se encontraban los archivos que ejecutaban ambas descompresiones. A continuación, se ejecutaron los comandos especificados en la Figura 28, donde la primera línea descomprime todos los archivos de extensión “.gz”, la segunda línea descomprime los archivos de observación de formato “.crx” a “.rnx”, y la tercera línea elimina los archivos en formato “.crx” restantes.

```

PS C:\cygwin64\bin> .\gzip -d *.gz
PS C:\cygwin64\bin> foreach ($file in ls *.crx) { .\CRX2RNX $file }
PS C:\cygwin64\bin> Remove-Item *.crx
PS C:\cygwin64\bin> |

```

Figura 28: Secuencia de comandos ejecutados para descomprimir los archivos de observación y navegación

Nombre	Tipo	Tamaño
SNTG1000	Archivo 23B	39.488 KB
SNTG1000	Archivo 23N	572 KB
SNTG1000	Archivo 23O	398.499 KB

Figura 29: Archivos a procesar con Pegasus para el día 10 de abril de 2023

Una vez obtenido todos los archivos en formato RINEX, éstos debían ser concatenados para tener un sólo archivo de navegación y de observación por día. Normalmente, esta concatenación se puede llevar a cabo mediante el software TEQC si los archivos tienen formato RINEX 2. No obstante, el IGN proporciona sus ficheros en formato RINEX 3 desde el 1 de diciembre de 2020. Por este motivo, se optó por realizar la concatenación de archivos mediante un script creado en matlab. Dicho fichero mantenía el encabezado de la hora 0 y concatenaba los archivos de manera cronológica, omitiendo los encabezados de las horas posteriores. En el caso de los archivos de observación, la época de última observación en el encabezado del fichero generado se cambió de manera manual.

Además, los ficheros diarios debían seguir una nomenclatura uniforme. Se optó por que los archivos de navegación, observación y SBAS tuvieran el mismo nombre para cada día analizado y sólo cambiara la extensión a “.23n”, “.23o”, y “.23b”, respectivamente. La Figura 29 muestra la nomenclatura seguida, para los ficheros correspondientes al 10 de abril. Cabe destacar que esta nomenclatura es la propia de los archivos RINEX 2, tal y como se explica en la Sección 8.1, y por la que se optó debido a su mayor sencillez. No obstante, el software Pegasus puede identificar que los archivos de navegación y observación se encuentran en formato RINEX 3 independientemente de su nombre.

10.3.4. Proceso de datos: Pegasus

El proceso de datos en el software Pegasus se hizo, para cada uno de los días analizados, mediante el uso de 3 programas independientes, a saber, Convertor, GNSS_Solution, y MFile Runner. Cabe destacar que el análisis de la continuidad y disponibilidad no se evaluaron mediante el software Pegasus, sino que fueron analizados a partir de datos de rendimiento histórico obtenidos en la página web de EGNOS [63] [64].

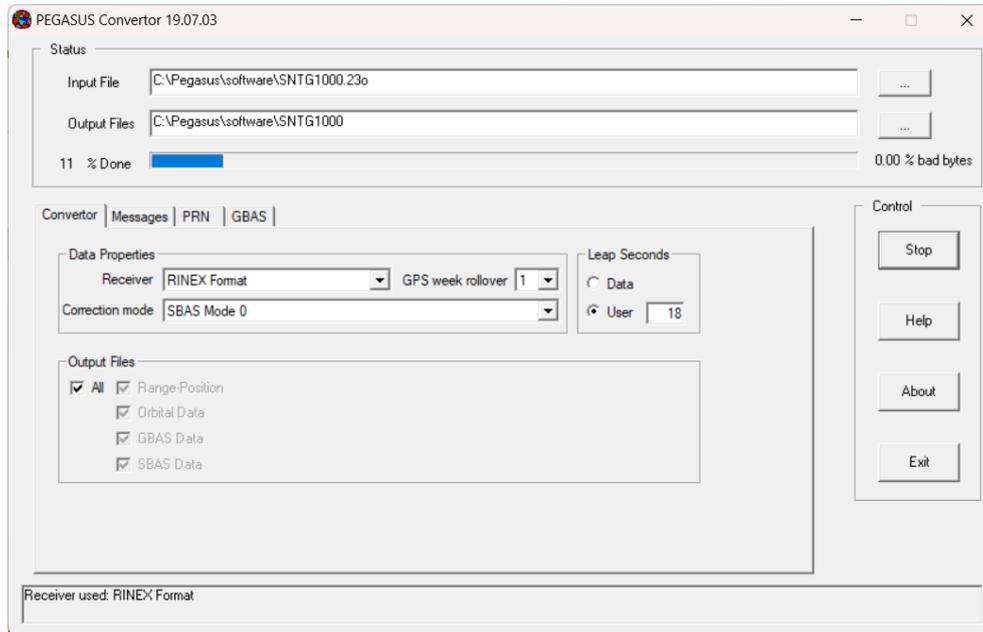


Figura 30: Interfaz del programa Convertor

10.3.4.1. Programa Convertor

El programa Convertor se encarga de leer los datos de los archivos de observación y SBAS, haciendo además mediante la interfaz un recuento de los rangos GPS y Galileo medidos y de los tipos de mensajes SBAS encontrados, tal y como se puede ver en la Figura 31. Producto de este programa es un archivo de extensión “.rng” para cada día procesado, que fue posteriormente introducido en el siguiente programa.

En la Figura 30 se muestra la interfaz del programa cuando se ejecuta el archivo de observación del día 10 de abril. Cabe destacar que los segundos que separan el tiempo UTC del tiempo GPS, llamados *leap seconds*, son establecidos manualmente en 18 segundos, de acuerdo con la fecha en la que se tomaron las mediciones. Del mismo modo, se especifica manualmente el tipo de archivo, que tiene formato RINEX, y el modo de corrección, que se establece en tipo SBAS MODE 0, de manera que el mensaje SBAS MT0 se procesa sin modificaciones en el contenido del mensaje [65]. No obstante, en la Figura 31 se observa que el mensaje tipo 0 ha sido transmitido. Este hecho, según lo visto en la Sección 5.3.1, indica que no se podría utilizar la señal para aplicaciones SoL. A pesar de esto, se procede con el proceso puesto que se está simulando la validación de un sistema aún no implementado.

10.3.4.2. Programa GNSS_Solution

A continuación se utiliza el programa GNSS_Solution, en el que se introduce el fichero “.rng” generado por el programa anterior, y que junto con los archivos de navegación, proporcionan ficheros con

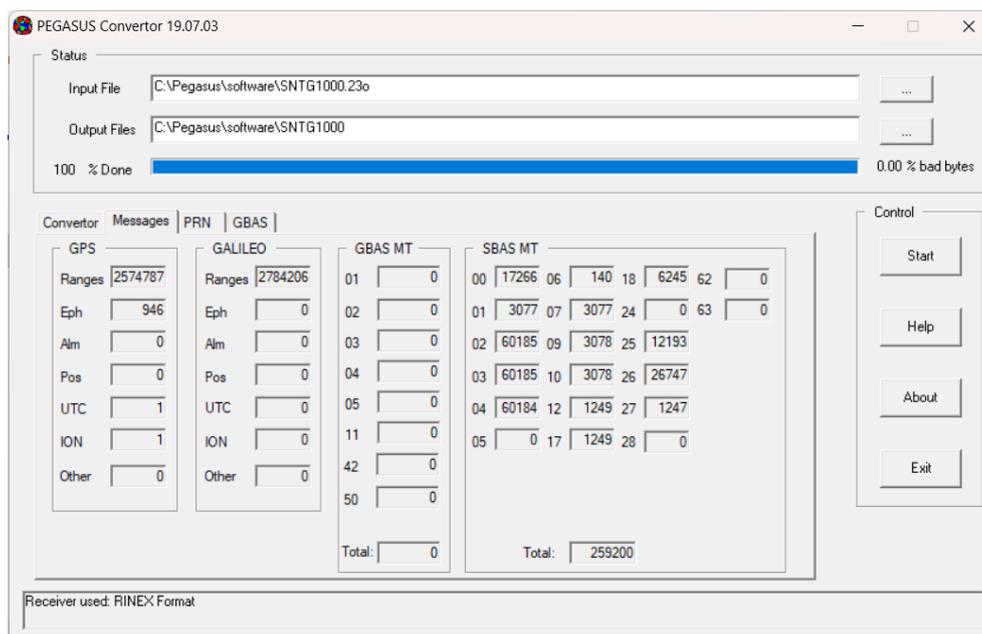


Figura 31: Resultados del programa Convertor

extensión “_sol.mif”.

En la Figura 32 se muestra la interfaz del programa, en la que se han introducido las coordenadas de la estación SNTG, que han sido extraídas del IGN [61] y que corresponden a las mostradas en la Tabla 13. Al seleccionar en las opciones el sistema SBAS, la posición será determinada utilizando mediciones GNSS, con las correcciones de tipo rápida, lenta e ionosférica proporcionadas por SBAS [65]. El PRN elegido fue el 136, ya que como se mostró en la Tabla 6, éste es el satélite con una longitud (5° E) más cercana a la del lugar analizado, por lo que se espera una potencia de señal mayor.

Además, este programa ofrece información gráfica a la vez que procesa los datos. Éste hecho se puede ver en la Figura 33, donde se observa, para cada época, los niveles de protección y los errores horizontal y vertical.

10.3.4.3. MFile Runner

El último programa, MFile Runner, proporcionó los resultados de integridad y precisión mediante la generación de histogramas y archivos “.xml”, respectivamente. Para ello se usaron los subprogramas mostrados en la Figura 34, utilizando como input el archivo generado anteriormente por el programa GNSS_Solution.

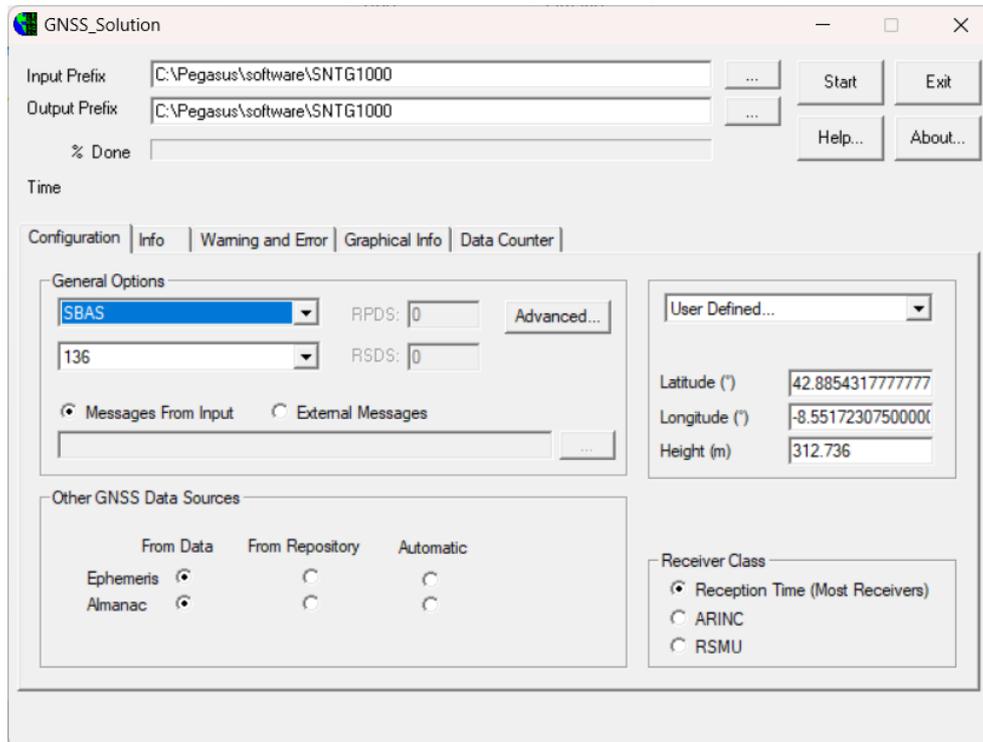


Figura 32: Interfaz del programa GNSS_Solution



Figura 33: Información gráfica que se obtiene del programa GNSS_Solution

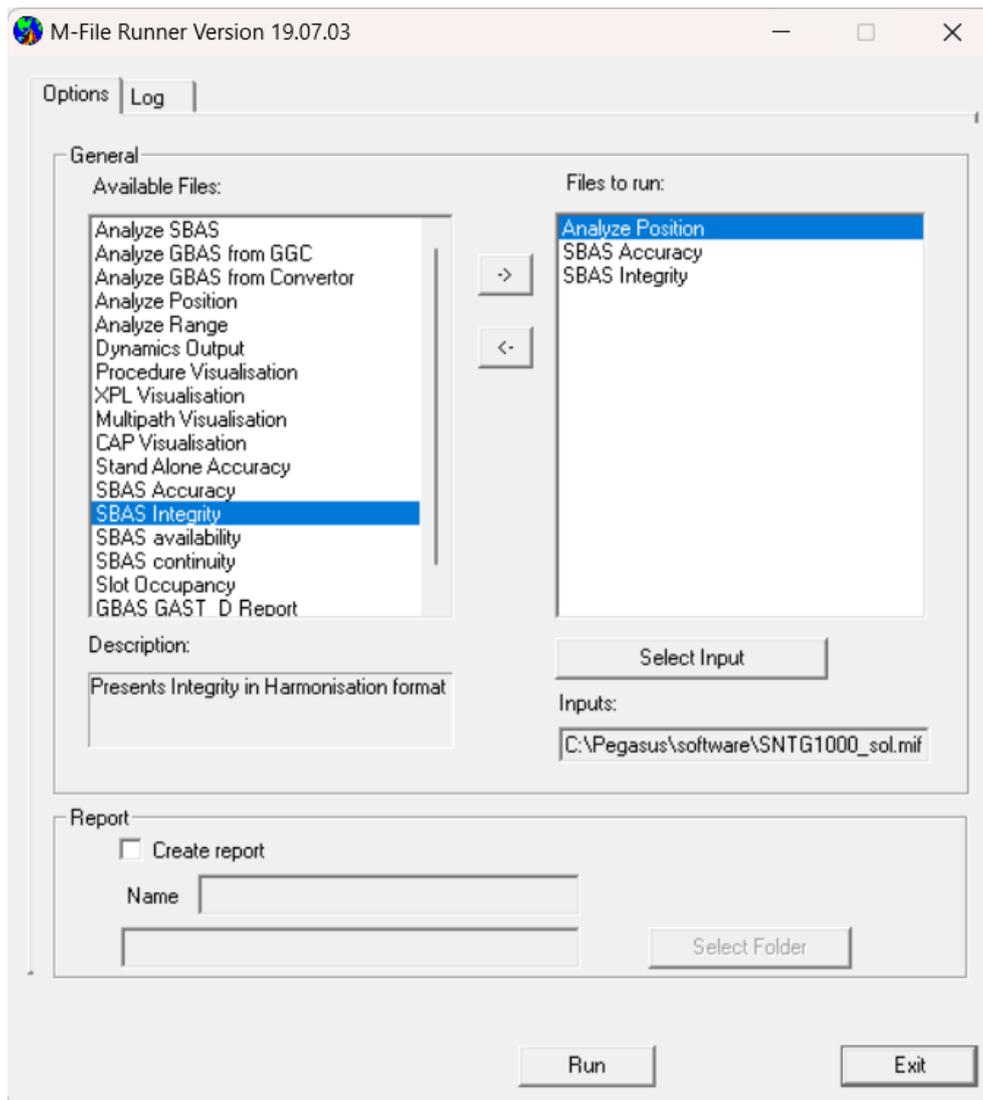


Figura 34: Interfaz del programa MFile Runner

Capítulo 11

Resultados

11.1. Validación a largo plazo

A continuación, en las secciones 11.1.1,11.1.2,11.1.3,11.1.4 se muestran los resultados obtenidos tras la validación a largo plazo de un potencial procedimiento LPV-200. El análisis de dichos resultados se realiza en la sección 11.3.1.

11.1.1. Precisión

	2022-10	2022-11	2022-12	2023-01	2023-02	2023-03
HNSE 95 % (m)	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.5
VNSE 95 % (m)	1.1	1.2	1.1	1.1	1.3	1.4
% de muestras con LPV-200 disponible	99.95 %	99.90 %	100.00 %	99.99 %	100.00 %	100.00 %

Tabla 14: Precisión EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]

11.1.2. Integridad

	2022-10	2022-11	2022-12	2023-01	2023-02	2023-03
HSI 95 %	0.46	0.52	0.35	0.5	0.35	0.53
VSI 95 %	0.32	0.35	0.33	0.35	0.37	0.37

Tabla 15: Máximo riesgo de integridad EGNOS LPV-200 [66, 67, 68, 69, 70, 71]

11.1.3. Disponibilidad

11.1.3.1. Disponibilidad SIS

Disponibilidad (%)	2022-10	2022-11	2022-12	2023-01	2023-02	2023-03
PRN123	99.9	99.99	99.99	99.99	99.93	100
PRN136	99.99	100	99.97	99.99	99.95	99.99
Al menos un satélite EGNOS geostacionario	100	100	100	100	100	100

Tabla 16: Disponibilidad SIS de EGNOS (%) en los satélites geostacionarios de EGNOS [66]**11.1.3.2. Disponibilidad de la Operación**

	2022-10	2022-11	2022-12	2023-01	2023-02	2023-03
Disponibilidad	≥ 99.9 %	≥ 99 %	≥ 99.9 %	≥ 99.9 %	≥ 99 %	≥ 98 %

Tabla 17: Disponibilidad EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]**11.1.4. Continuidad**

	2022-10	2022-11	2022-12	2023-01	2023-02	2023-03
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$			

Tabla 18: Continuidad EGNOS LPV-200 para la estación SDC [66, 67, 68, 69, 70, 71]**11.2. Validación a corto plazo**

De igual modo, en las secciones 11.2.1, 11.2.2, 11.2.3, 11.2.4 se muestran los resultados obtenidos tras la validación a corto plazo de un potencial procedimiento LPV-200. El análisis de dichos resultados se realiza en la sección 11.3.2.

11.2.1. Precisión

Nombre	Servicio	Muestras	Media [m]	RMS [m]
HNSE	LPV200	86039	1.34102	1.38231
VNSE	LPV200	86039	0.665959	0.822008

Tabla 19: Valores de precisión para la estación SNTG, 10 de abril de 2023

Nombre	Servicio	Muestras	Media [m]	RMS [m]
HNSE	LPV200	86039	1.38781	1.42627
VNSE	LPV200	86039	0.688083	0.828526

Tabla 20: Valores de precisión para la estación SNTG, 11 de abril de 2023

11.2.2. Integridad

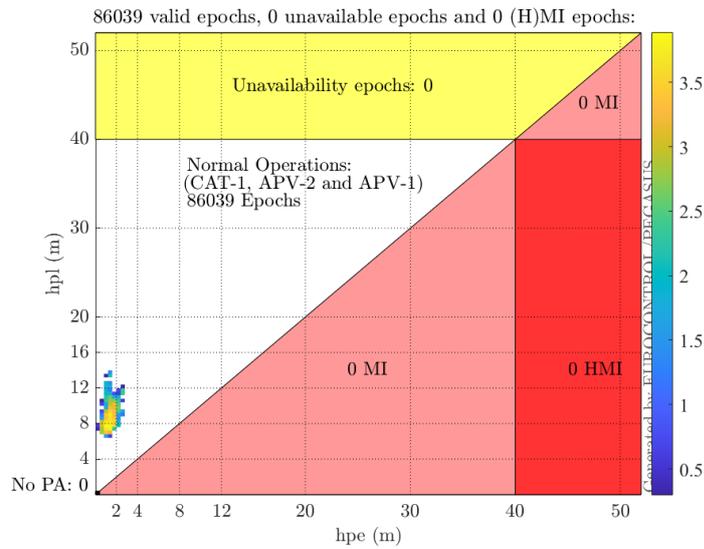


Figura 35: Diagrama de Stanford horizontal para la estación SNTG, 10 de abril de 2023

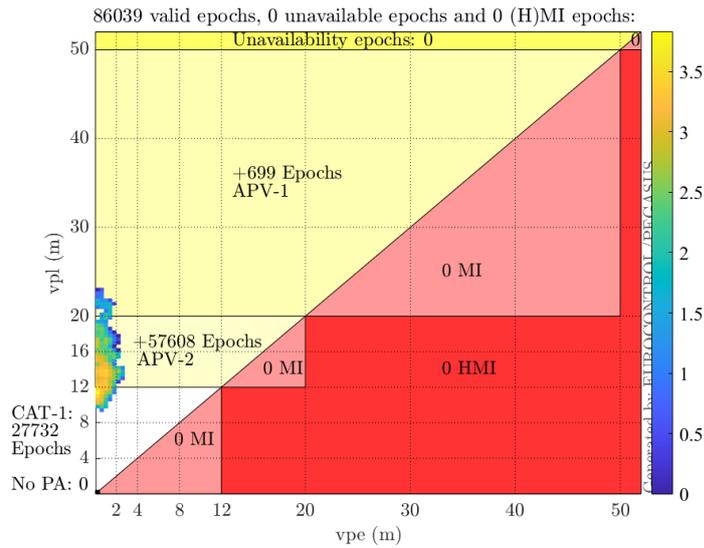


Figura 36: Diagrama de Stanford vertical para la estación SNTG, 10 de abril de 2023

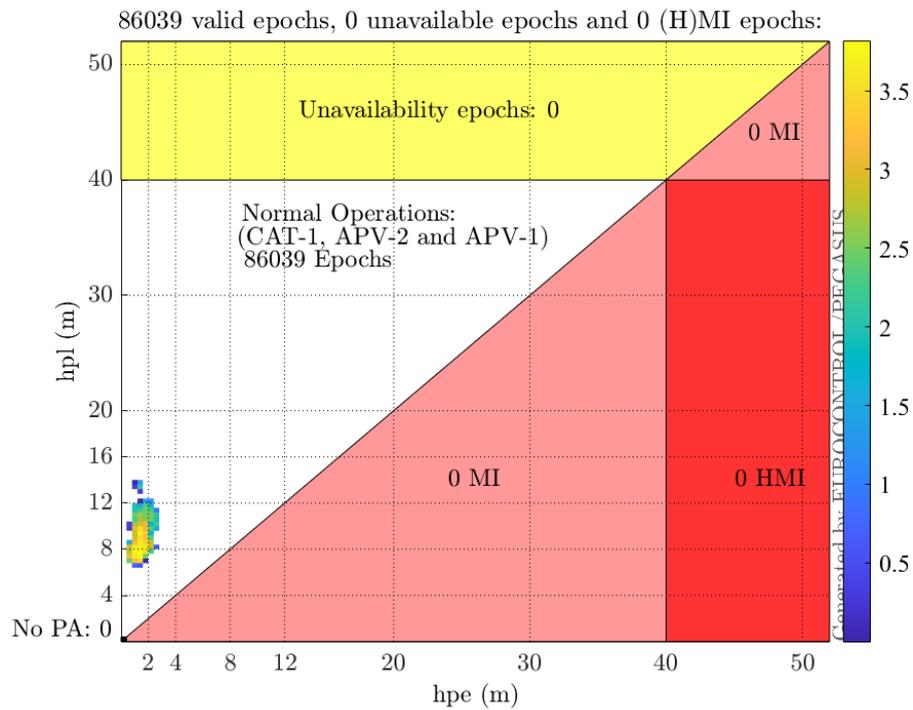


Figura 37: Diagrama de Stanford horizontal para la estación SNTG, 11 de abril de 2023

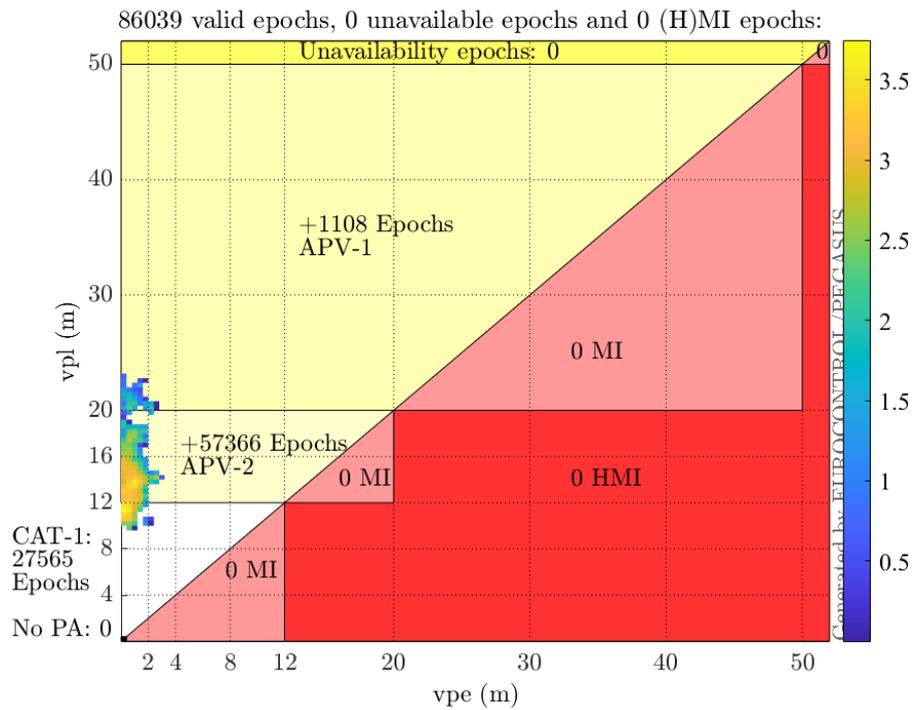


Figura 38: Diagrama de Stanford vertical para la estación SNTG, 11 de abril de 2023

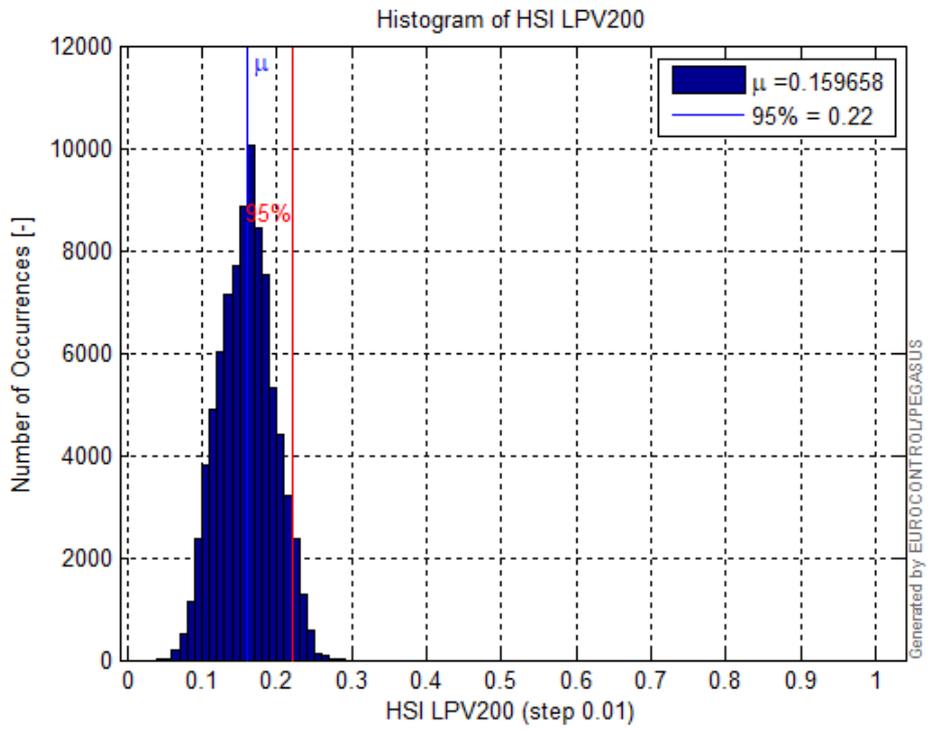


Figura 39: Histograma de integridad horizontal para la estación SNTG, 10 de abril de 2023

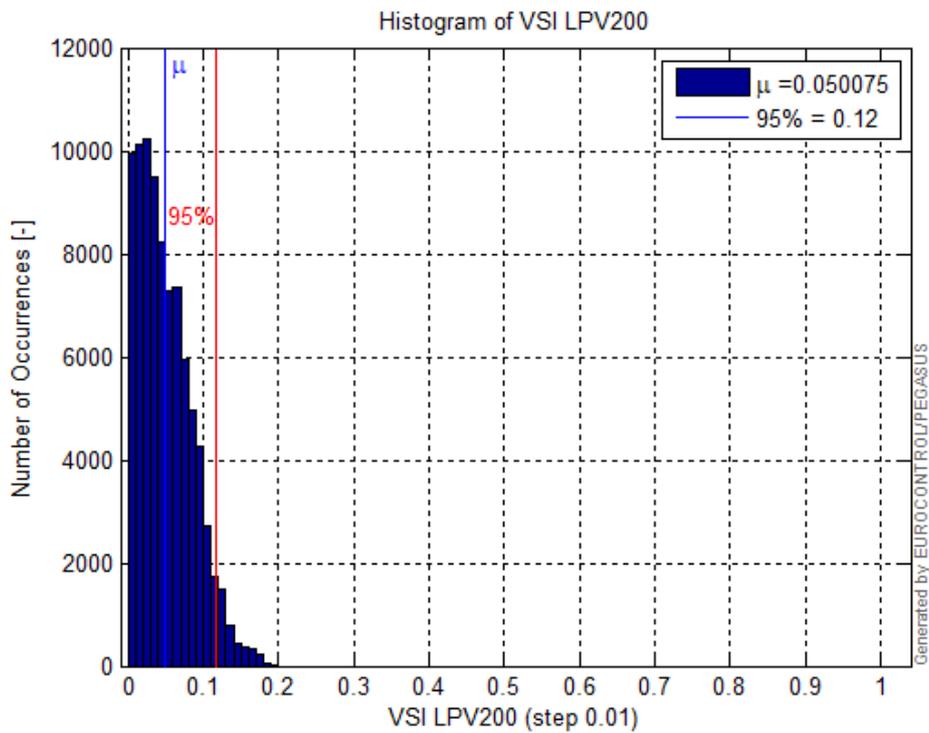


Figura 40: Histograma de integridad vertical para la estación SNTG, 10 de abril de 2023

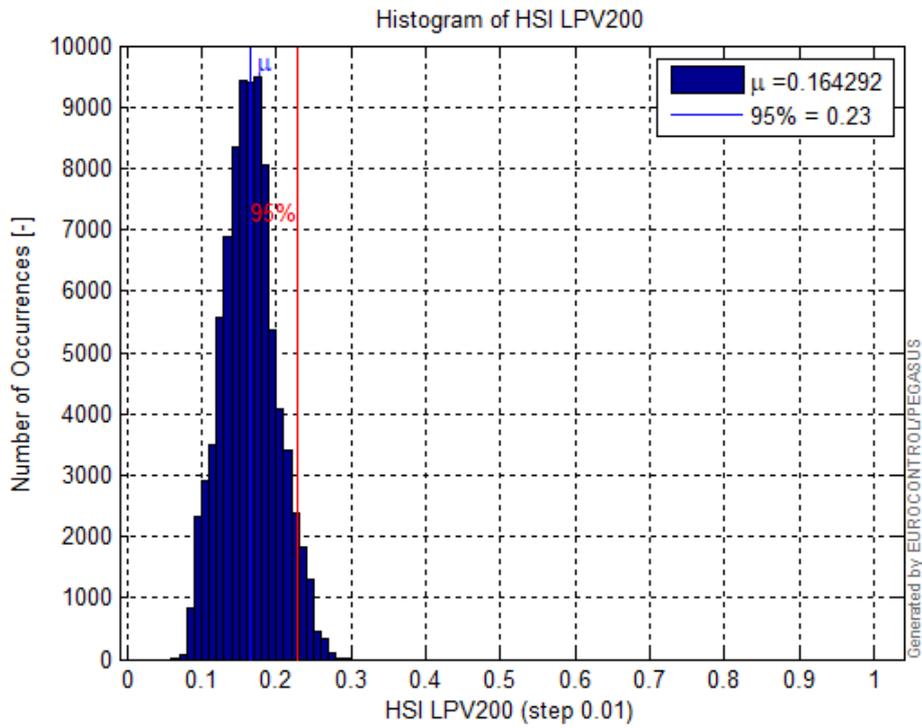


Figura 41: Histograma de integridad horizontal para la estación SNTG, 11 de abril de 2023

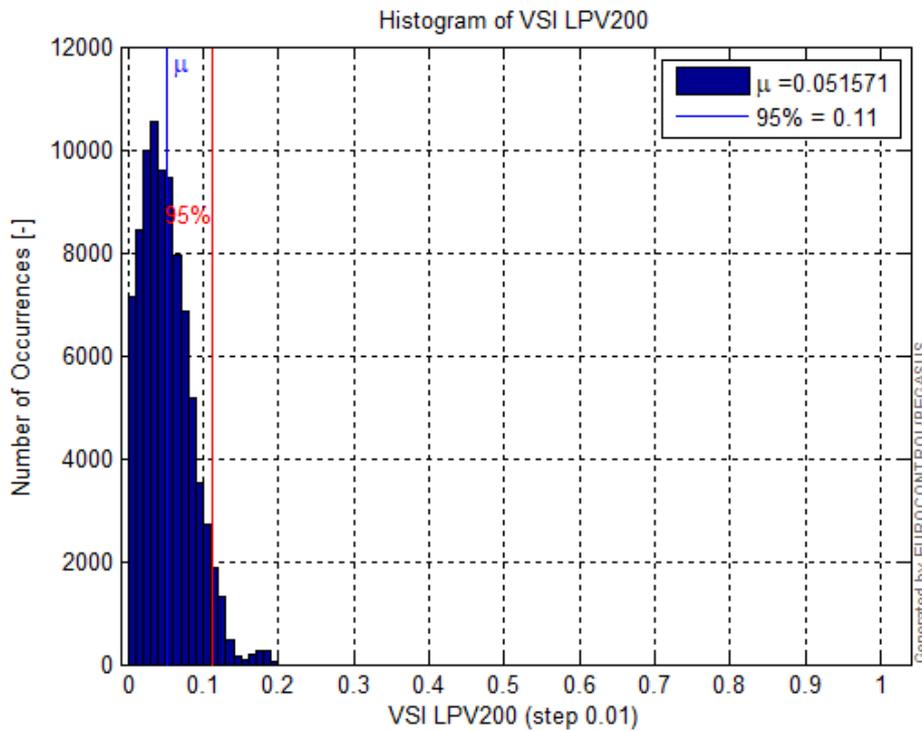


Figura 42: Histograma de integridad vertical para la estación SNTG, 11 de abril de 2023

11.2.3. Disponibilidad

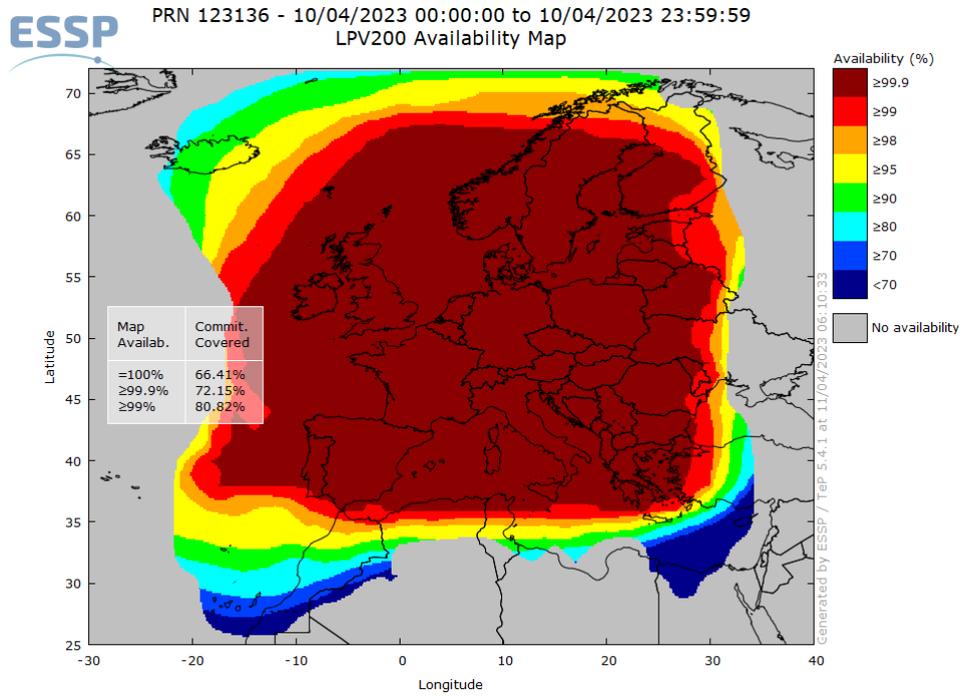


Figura 43: Disponibilidad combinada, 10 de abril de 2023 [63]

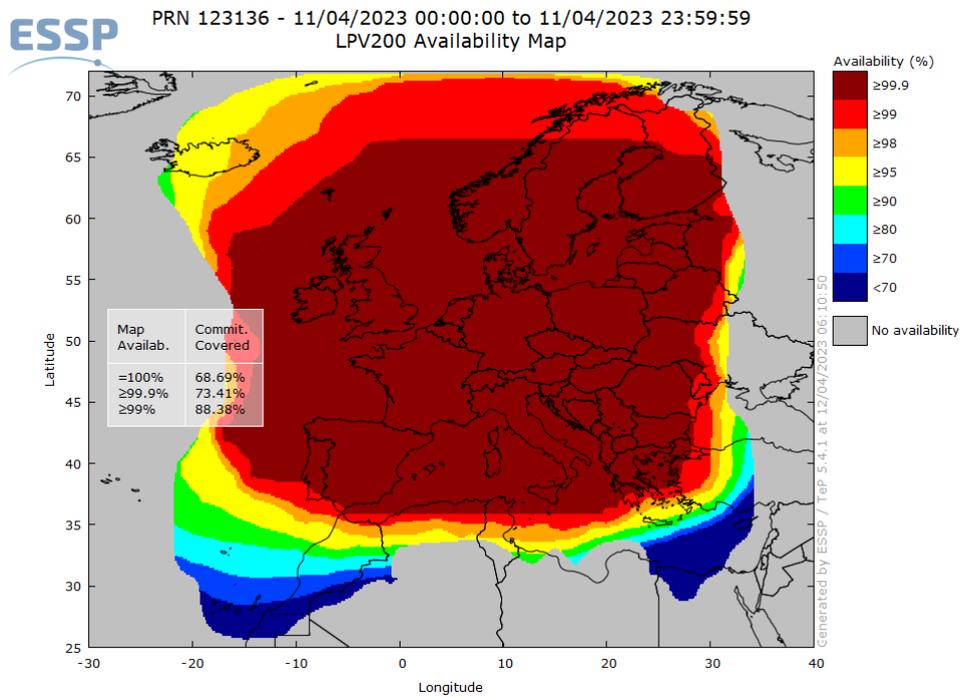


Figura 44: Disponibilidad combinada, 11 de abril de 2023 [63]

11.2.4. Continuidad

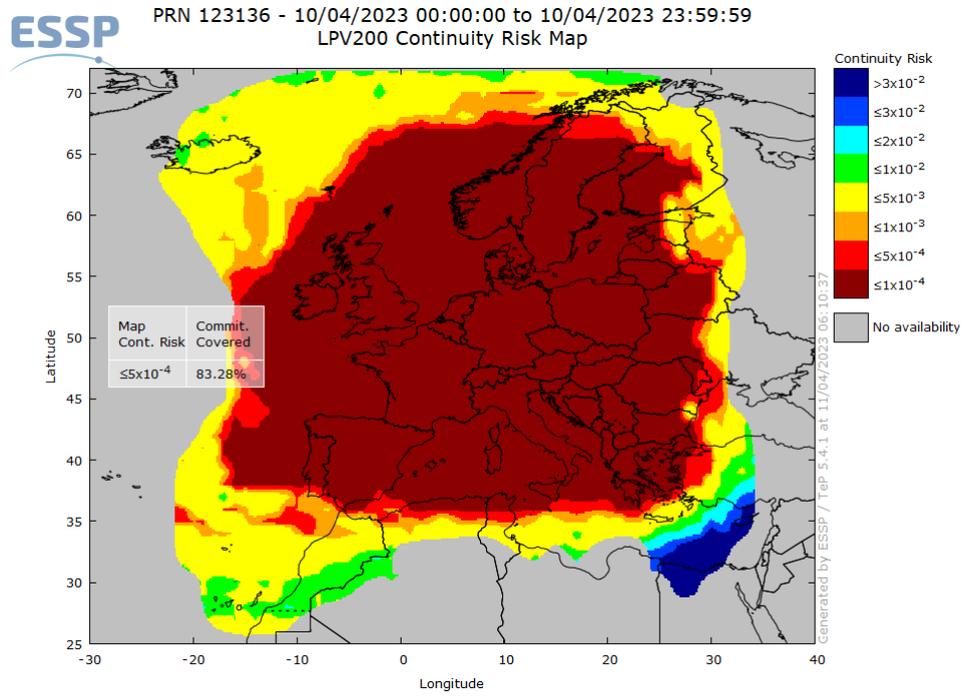


Figura 45: Continuidad combinada, 10 de abril de 2023 [64]

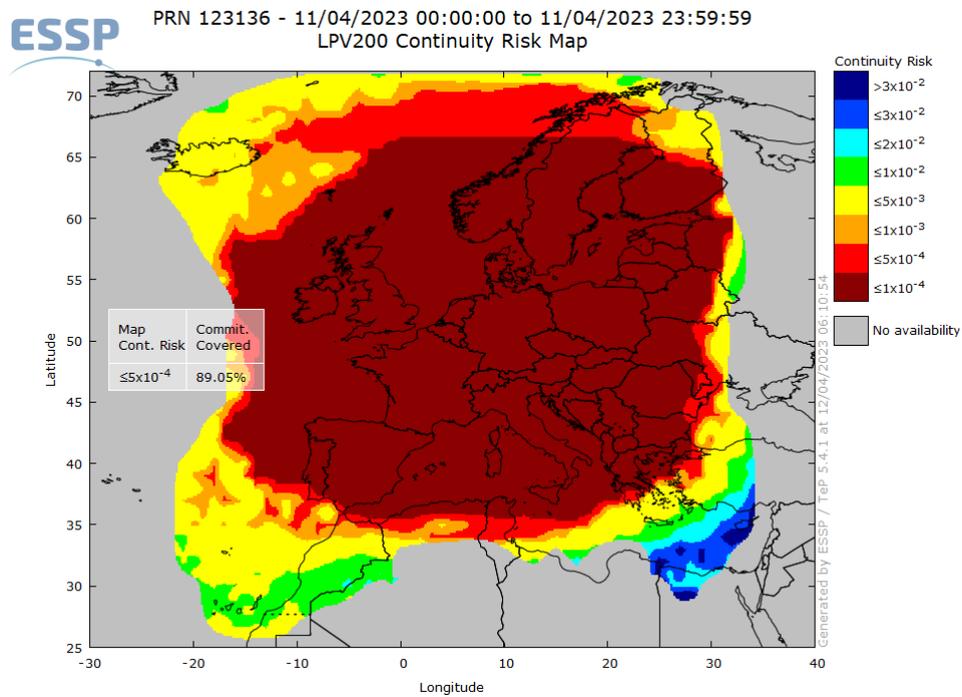


Figura 46: Continuidad combinada, 11 de abril de 2023 [64]

11.3. Análisis

11.3.1. Análisis a largo plazo

Dados los resultados a largo plazo, se puede comenzar con su análisis. En primer lugar, el análisis de la precisión se elabora mediante la Tabla 14, que recoge los datos de los últimos meses para la estación RIMS más cercana al aeropuerto seleccionado, SDC, y en donde se refleja el HSNE y VNSE del percentil 95 en metros, así como el porcentaje de muestras en los que el servicio estaba disponible, para cada uno de los meses en estudio. La OACI establece que la precisión debe ser de al menos 16 m en horizontal, y de entre 4 y 6 metros en vertical. Se puede observar que los valores proporcionados en la Tabla 4 ofrecen una precisión mayor en ambos casos.

En segundo lugar, la Tabla 15 muestra el valor máximo que alcanzan los índices de seguridad horizontal y vertical para los seis últimos meses, en donde se puede ver que no solo se sitúa siempre por debajo de 1, sino que incluso se sitúa por debajo de 0.6, cumpliendo claramente los requisitos de la OACI.

Además, de acuerdo con el informe mensual de marzo de 2023 [66], la disponibilidad de al menos un satélite EGNOS fue del 100 %, como se puede ver en la Tabla 16, por lo que la disponibilidad SIS estuvo garantizada. Aunando datos de los seis últimos informes para la localización del Aeropuerto de Santiago se puede obtener la Tabla 17, de donde se verifica que el criterio de disponibilidad marcado por la OACI se cumple para los meses de octubre a febrero, pero no para marzo, donde no se puede asegurar una disponibilidad mínima del 99 %. Este hecho se explica por las condiciones de alta radiación solar y sus asociados errores inosféricos, que la propia ESSP advirtió en su nota de servicio número 25 [37], y que en ningún caso son representativas del sistema, por lo que su rendimiento insatisfactorio no frena proseguir con el análisis a corto plazo. Debe ser remarcado que el impacto del ciclo solar se eliminará cuando se introduzca en los próximos años la doble frecuencia en la versión V3 de EGNOS [37].

Por último, los datos de continuidad de los seis últimos informes mensuales de EGNOS, como se muestra en la Tabla 18, indican que en ningún mes se cumplió el requisito de continuidad. Si bien la actividad solar parece también afectar los resultados de continuidad de los dos últimos meses analizados, los resultados de los meses previos tampoco cumplen con los requisitos de la OACI. No obstante, los valores reflejados en la Tabla 18 están dentro de los valores de rendimiento nominal que EGNOS publica en la definición del servicio SoL [32], por lo que se consideran suficientes para comenzar a proveer el servicio EGNOS en aviación civil si las autoridades de navegación aérea definen medidas para mitigar los riesgos de carácter operativo [32].

Conociendo estos datos, se procede al análisis de la validación a corto plazo.

11.3.2. Análisis a corto plazo

Comenzando por el análisis de la precisión, se puede observar en las Tablas 19 y 20 que el valor medio de la precisión, tanto horizontal como vertical, para ambos días, se mantiene dentro de los límites de 16 y 6 metros, respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que los valores de precisión son satisfactorios para una aproximación LPV-200.

Continuando con el análisis de la integridad, los histogramas de las Figuras 39,40,41 y 42 muestran siempre valores máximos del índice de seguridad inferiores a 1, lo que indica que no hay eventos en los que la información sea engañosa. Esto también se puede ver en los diagramas de Stanford de las Figuras 35,36,37 y 38, en donde las regiones MI se encuentran vacías.

Es importante destacar que el software Pegasus establece por defecto el límite de alerta vertical en 12 metros para la aproximación LPV-200, en lugar del límite máximo de 35 metros. Este hecho es consistente con la Tabla 4 y el Anexo 10 de la OACI [12], donde se especifica que, para una aproximación de precisión de Categoría I, solo se puede utilizar un límite de alerta vertical mayor a 10 metros si se ha realizado un análisis de seguridad específico para el sistema. Por lo tanto, aunque los diagramas de Stanford muestran que no todas las muestras cumplen con el requisito del límite de alerta vertical de 12 metros, un estudio de seguridad que permita establecer este límite en 35 metros garantizaría el cumplimiento de las condiciones para el servicio LPV-200 en todas las épocas procesadas.

En cuanto a la disponibilidad, se puede observar en la Figura 43 y 44 que el Aeropuerto de Santiago se encuentra con una disponibilidad mayor al 99.9 % para ambos días analizados, lo que significa que cumple los límites establecidos por la OACI.

En términos de continuidad, se puede observar en las Figuras 45 y 46 que, en ambos casos, el valor máximo del riesgo de continuidad se sitúa en 1×10^{-4} . Aunque este valor sigue siendo insuficiente para cumplir los requisitos que establece la OACI, al igual que en el análisis a largo plazo, los valores se sitúan dentro del rendimiento normal del servicio, por lo que podría esperarse que la validación prosiguiera con un ensayo de vuelo que verificara los resultados, una vez adoptadas medidas de seguridad adicionales.

Ahora, si bien los valores de continuidad y disponibilidad siguen lo que EGNOS considera valores nominales para la localización de la estación analizada, se puede observar en dichas Figuras que los valores para las zonas de latitudes por debajo de 35° o por encima de 65° tienen valores de rendimiento degradados. Este hecho, de nuevo, era de esperar de acuerdo con la nota de servicio emitida por EGNOS [37].

RIMS	Location	Country	Estimated LPV200	Real LPV200	Combined LPV200	HPE (95%)	VPE (95%)	Max HSI	Max VSI	HPL LPV200	VPL LPV200
SDC	Santiago de Compostela	Spain	100.00	100.00	100.00	1.19	1.29	0.23	0.2	11.64	19.9

Figura 47: Datos diarios de EGNOS para la estación SDC, PRN136, el 10 de abril de 2023 [72]

	HPE (95 %)	VPE (95 %)	HPL (99 %)	VPL (99 %)	max HSI	max VSI
ERGNSS: SNTG	1.89 m	1.54 m	11.40 m	19.60 m	0.29	0.20
RIMS: SDC	1.19 m	1.29 m	11.64 m	19.90 m	0.23	0.20
Error	58.82 %	19.38 %	2.06 %	1.51 %	26.09 %	0.00 %

Tabla 21: Comparación y tabla de errores entre los datos obtenidos mediante Pegasus para la estación SNTG el día 10/04/2023, y los datos oficiales de la RIMS SDC para el mismo día

11.3.2.1. Comparación con datos oficiales

Para verificar los resultados experimentales obtenidos, éstos han sido comparados con datos históricos diarios y oficiales de EGNOS para el servicio LPV-200. Si bien los datos que se han extraído de la página oficial aplican a la estación RIMS SDC, cabe esperar cierta correlación por la proximidad de ésta con la estación ERGNSS SNTG, ambas situadas en la misma ciudad. Los datos de rendimiento del servicio que se pueden extraer de la página de EGNOS para el día 10 de abril incluyen los datos de la Figura 47.

Comenzando por el análisis de la integridad, los valores máximos del índice de integridad recogidos para la estación SDC son 0.23 y 0.20 para los índices horizontal y vertical, respectivamente. Estos valores se sitúan en aproximadamente el mismo orden de magnitud con los obtenidos de manera experimental, que se sitúan en 0.29 y 0.20, respectivamente.

Con respecto a los valores de precisión, en la sección anterior se dieron valores medios. No obstante, EGNOS provee valores para el percentil 95. Recuperando estos datos de las simulaciones, se obtiene un error horizontal y vertical de 1.89 y 1.54 metros, respectivamente, como se observa en las Figuras 48 y 49. Los límites de protección, por otro lado, mantienen valores de 11.4 y 19.6 metros como se extrae de la Figura 50.

Una comparación cuantitativa se lleva a cabo mediante la Tabla 21, donde se incluyen también los errores de la comparación de ambas estaciones, tomando la estación RIMS como la estación de referencia. Si bien los límites de protección tienen errores por debajo del 5 %, los errores de precisión son demasiado altos como para poder relacionar ambas estaciones de manera directa.

Sin embargo, si consideramos las tendencias de los errores y niveles de protección en lugar de los valores numéricos, se puede observar que las tendencias son prácticamente idénticas, ya que los

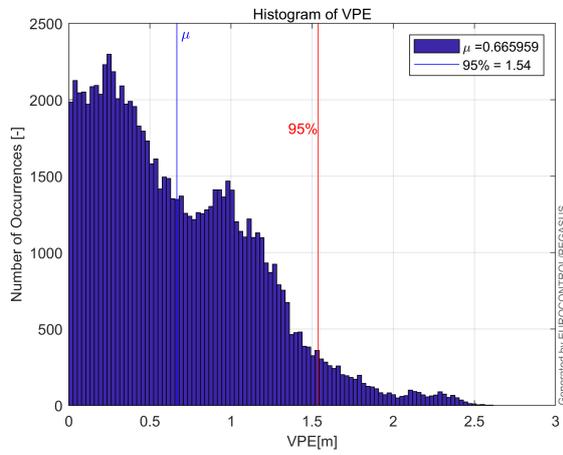
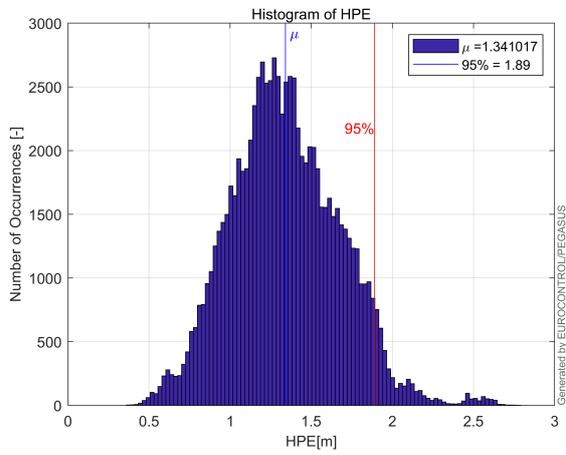


Figura 48: Histograma HPE con percentil 95 **Figura 49: Histograma VPE con percentil 95**

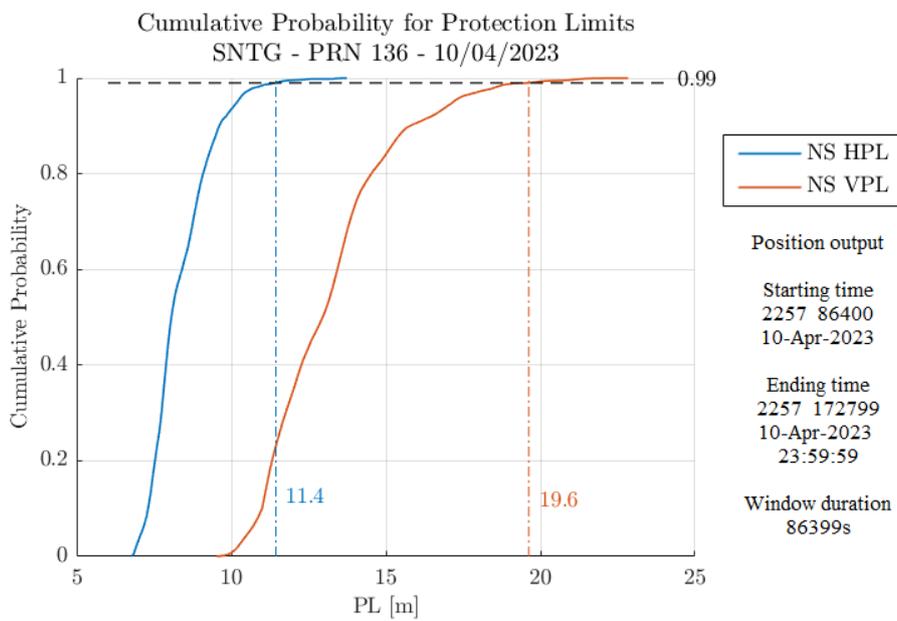


Figura 50: Probabilidad acumulada para los límites de protección

mínimos y máximos ocurren en los mismos puntos. Esta similitud se puede apreciar en las Figuras 51 y 53, que son prácticamente iguales a las que representan los datos oficiales de la estación RIMS en las Figuras 52 y 54, respectivamente. La similitud de las tendencias se explica por la proximidad entre ambas estaciones: es de esperar que los errores causados por los efectos ionosféricos y troposféricos (ya que las señales atraviesan las mismas porciones de la atmósfera) y aquellos relacionados con los satélites (puesto que los satélites visibles desde esas ubicaciones son los mismos) sean similares.

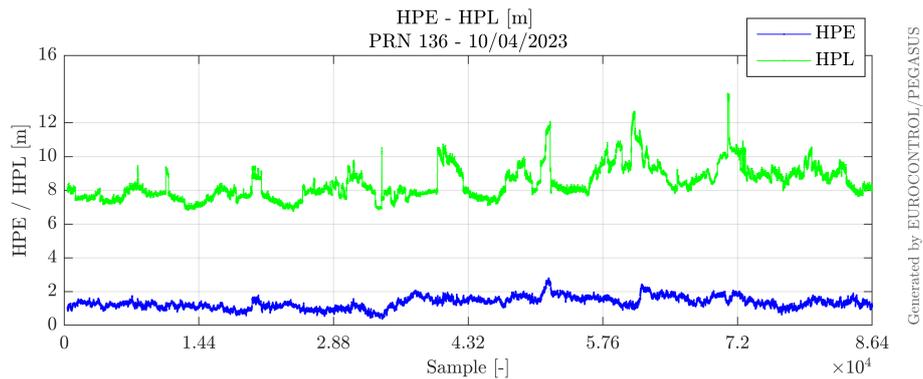


Figura 51: Evolución del HPE y HPL para la estación ERGNSS SNTG durante el 10 de abril

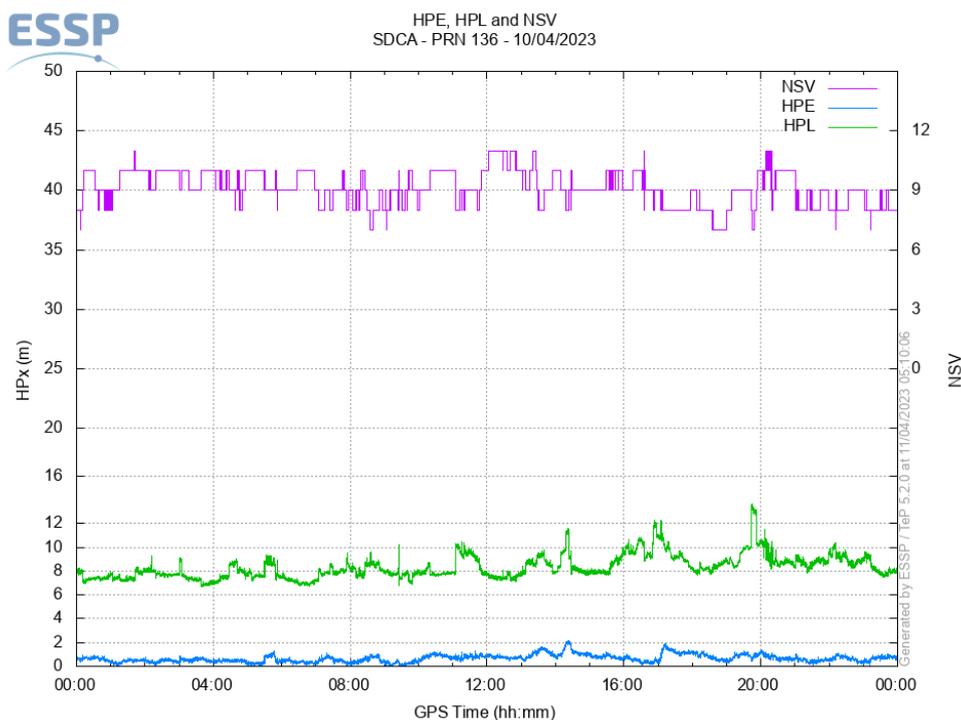


Figura 52: Evolución del HPE y HPL para la estación RIMS SDC durante el 10 de abril [39]

Siguiendo el mismo procedimiento, se puede obtener una segunda tabla de errores para el segundo día estudiado. En este caso, se omite la información gráfica y se muestra el resumen de la infor-

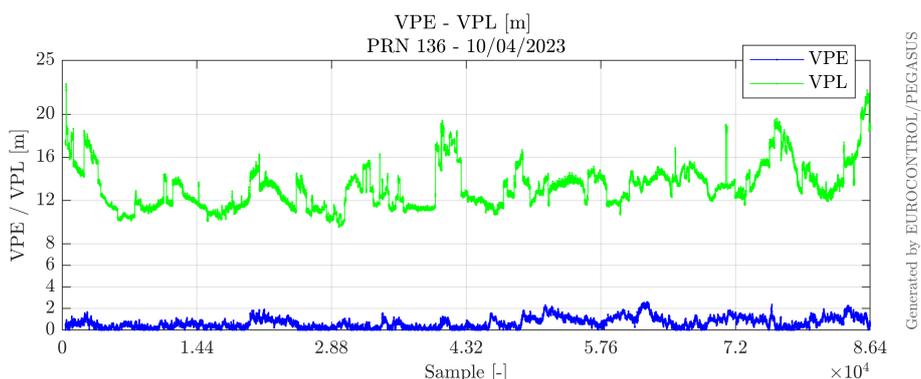


Figura 53: Evolución del VPE y VPL para la estación ERGNSS SNTG durante el 10 de abril

	HPE (95 %)	VPE (95 %)	HPL (99 %)	VPL (99 %)	max HSI	max VSI
ERGNSS: SNTG	1.96 m	1.51 m	11.50 m	20.30 m	0.30	0.20
RIMS: SDC	1.25 m	1.26 m	11.52 m	20.07 m	0.24	0.20
Error	56.80 %	19.84 %	0.17 %	1.15 %	25.00 %	0.00 %

Tabla 22: Comparación y tabla de errores entre los datos obtenidos mediante Pegasus para la estación SNTG el día 11/04/2023, y los datos oficiales de la RIMS SDC para el mismo día

mación obtenida en la Tabla 22. Se puede observar la consistencia entre la magnitud de los errores de ambos días, siendo los errores de precisión significativos, mientras que los de los niveles de protección vuelven a ser aceptables.

Teniendo en cuenta que ambas estaciones son diferentes y se encuentran en diferentes localizaciones, aunque dentro de la misma ciudad, diversos motivos pueden justificar estas diferencias y porcentajes de error. Estos motivos pueden estar relacionados con las fuentes de error o las limitaciones de los sistemas GNSS explicados en la Sección 6.3. Principalmente, es de esperar que la estación RIMS cuente con una antena más sofisticada, en la que el diseño o las técnicas de filtrado puedan reducir errores de multipath, mejorar la ganancia de señal y proporcionar una mejor recepción de las señales GNSS. En definitiva, los errores asociados al receptor son diferentes en ambos casos, por lo que las estaciones RIMS proveen mejores soluciones de posición.

De hecho, la Agencia Espacial Europea indica que la mayoría de antenas RIMS V2 están rodeadas de un estructura protectora que limitan el impacto de interferencias y efectos de multipath [40]. En versiones futuras, se espera que las RIMS V3 cuenten con antenas aún más complejas que sean capaces de proteger estas estaciones de entornos de radiofrecuencia duros sin la necesidad de estas estructuras. La agencia también está trabajando en el diseño de antenas mejoradas como antenas “dual tracking”, que han demostrado hacer frente a condiciones especialmente difíciles [40].

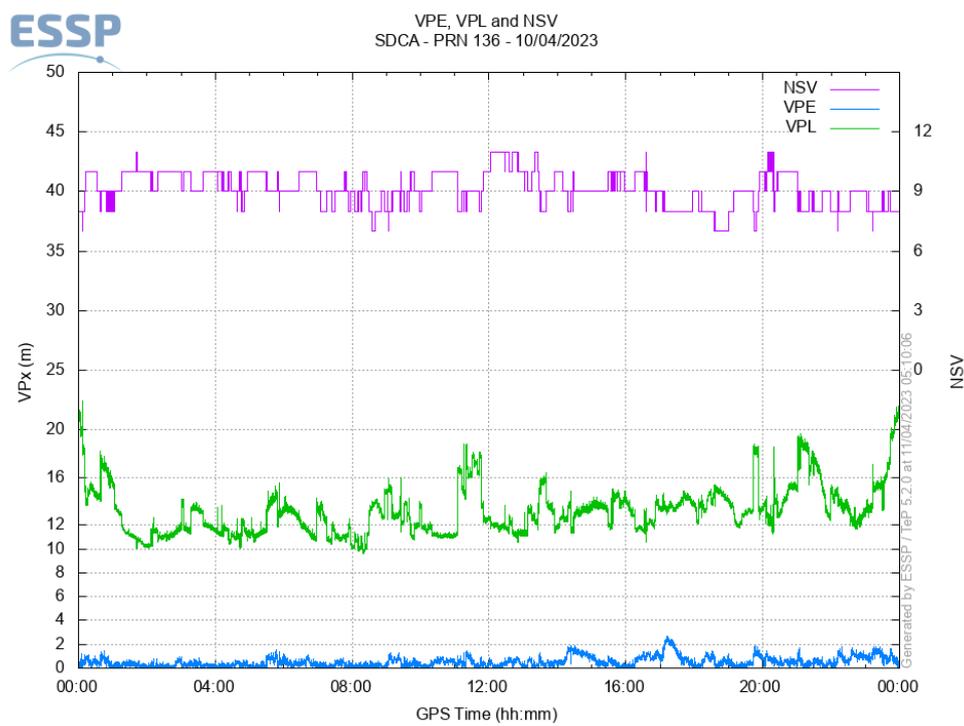


Figura 54: Evolución del VPE y VPL para la estación RIMS SDC durante el 10 de abril [39]

Capítulo 12

Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

Las aproximaciones LPV-200 han sido enmarcadas dentro de las aproximaciones habilitadas por sistemas de aumentación GNSS, y a su vez, dentro de las especificaciones RNP APCH de la PBN y el concepto de espacio aéreo. El estado del arte de estas aproximaciones también ha sido presentado, quedando patente el gran número de aproximaciones habilitadas por los sistemas SBAS en comparación con los GBAS. El análisis del sistema SBAS europeo EGNOS ha permitido finalmente cumplir con los dos primeros objetivos planteados en la sección 1.2, centrados en establecer el marco teórico.

Posteriormente, la Parte II se centró en analizar, dentro del proceso de validación, los parámetros de calidad que se obtendrían en el aeropuerto de Santiago de Compostela - Rosalía de Castro analizando datos oficiales de estaciones cercanas. Para ello, se realizó un estudio a largo plazo utilizando informes oficiales de EGNOS, y un procesado de datos para el corto plazo a través del software Pegasus, utilizando también datos crudos oficiales.

Este análisis ha permitido conocer que, en lo que respecta al largo plazo, el mes de marzo presentó condiciones de disponibilidad anormalmente bajas debido a una alta actividad solar que lleva asociados grandes errores ionosféricos. Este hecho sin embargo no impidió proseguir con el proceso de validación a corto plazo, en el que se concluyó que los parámetros de calidad analizados para los días 10 y 11 de abril cumplían los requisitos marcados por la OACI, si se considera el límite de alerta vertical máximo de 35 metros para LPV-200 en lugar de los 12 metros que utiliza Pegasus por defecto, y para lo cual debe llevarse a cabo un estudio de seguridad que permita establecer este límite. Especial lectura se debe hacer de la continuidad, que en ningún caso alcanzó las mínimas establecidas, pero que representan valores de rendimiento nominales y pueden considerarse aceptables si el aeropuerto establece, una vez más, medidas de seguridad complementarias.

La verosimilitud de los resultados obtenidos mediante el procesado de datos queda demostrada

al establecer una comparación directa de éstos con los datos de estaciones oficiales de EGNOS. Si bien los datos oficiales no son idénticos a los obtenidos, el hecho de que las antenas RIMS cuenten con diseño y técnicas de filtrado avanzadas justifican las diferencias observadas, teniendo en cuenta también que se comparan dos antenas diferentes con también diferentes aplicaciones.

Estos hechos parecen indicar que el aeropuerto de Santiago-Rosalía de Castro podría contar, en lo que a parámetros de calidad se refiere, con un procedimiento LPV-200 que permita aproximaciones con tramos más optimizados, mejorando tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad ambiental. El proceso realizado solo ha estudiado la precisión, continuidad, integridad y disponibilidad del servicio LPV-200 ofrecido por EGNOS, pero éste deberá ser complementado por todo un extenso proceso IFP como el mencionado en el Capítulo 9, con un proceso de adquisición de datos y proceso de diseño en el que se realice una validación completa.

En este estudio se evidencia la importancia de la influencia ionosférica en los procesos de datos GNSS, especialmente en aplicaciones que requieren alta precisión y en períodos de alta radiación solar. Se reconoce además el esfuerzo de EGNOS para mejorar esta fuente principal de errores en GNSS, a través de mejoras como la implementación de doble frecuencia, que se espera mitigue los errores ionosféricos con mayor eficacia en la próxima versión de EGNOS [40]. Estas mejoras tendrían un impacto significativo en los procesos de validación al reducir la influencia de la radiación ionosférica y permitir un mayor nivel de precisión en los datos GNSS. Por tanto, cabe esperar que las futuras mejoras de EGNOS faciliten y optimicen los procesos de adquisición de datos y diseño, fortaleciendo a su vez la validez de los resultados obtenidos en estudios de validación completos futuros.

Parte III

Pliego de condiciones

Capítulo 13

Pliego de condiciones

13.1. Condiciones generales

El estudio bibliográfico y el posterior análisis de los parámetros de calidad del procedimiento LPV-200 se llevaron a cabo, exclusivamente, mediante el uso de equipos informáticos con pantallas de visualización. No obstante, el uso de estos dispositivos por parte de los trabajadores puede conllevar ciertos riesgos. Por ello, el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril marca a nivel nacional las medidas para garantizar su seguridad y salud [73].

13.1.1. Real Decreto 488/1997

El Real Decreto 488/1997 establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización por parte de los trabajadores. Este Real Decreto se aplica en conjunto con las disposiciones de la Ley 31/1995 del 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales.

Dentro de este Real Decreto, toma especial relevancia el Artículo 3, que establece las obligaciones del empresario en relación con la adopción de medidas para eliminar o reducir al mínimo los riesgos asociados con la actividad de los trabajadores. Se definen por tanto unos posibles riesgos a evaluar, que pueden incluir:

- a) Riesgo para la vista: como la aparición de sequedad ocular, visión borrosa o fatiga visual.
- b) Problemas físicos: como una incorrecta postura que provoque dolores musculares y que deriven en lesiones a largo plazo.
- c) Problemas de carga mental: como estrés, fatiga o dificultad para lograr la concentración.

Asimismo, estos riesgos pueden interactuar entre sí, combinando sus efectos y patologías. La evaluación de los mencionados riesgos se llevará a cabo teniendo en cuenta las características específicas del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea. En particular, se deben considerar los siguientes aspectos:

- a) El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
- b) El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
- c) El grado de atención que exija dicha tarea.

Adicionalmente, el Real Decreto incluye disposiciones relacionadas con la vigilancia de la salud, la obligación de proporcionar formación a los trabajadores sobre estos riesgos y la consulta y participación de los trabajadores en las cuestiones relacionadas con este Real Decreto.

Del mismo modo, su Anexo describe unas disposiciones mínimas que debe cumplir el puesto de trabajo para garantizar la prevención de riesgos laborales y seguridad. En este Anexo se define el equipo, que debe estar formado por pantalla, teclado, superficie de trabajo y asiento, que permitan una postura ergonómica; se describe el entorno de trabajo, que debe tener dimensiones e iluminación adecuadas, así como reflejos, ruido, calor, emisiones y humedad reducidas y dentro de valores aceptables; y se fijan las bases para una correcta interconexión ordenador/persona [73].

13.2. Condiciones de especificaciones técnicas

13.2.1. Hardware

La realización de este documento requirió del uso de un hardware que pudiera operar los programas de software que se mencionan en la Sección 13.2.2. Dentro de dichos programas, el que fija unos requisitos de hardware más estrictos es Pegasus mediante su manual de usuario, y que requiere de [65]:

- Procesador Intel de al menos 350 MHz.
- Espacio en disco duro de 60 MB para la instalación.
- Espacio para el procesamiento de datos de al menos 1GB, con recomendación de 5GB.
- Memoria RAM de al menos 128 MB, con recomendación de 256 MB.

Estos requisitos se cumplen con creces por el equipo utilizado, que es un ordenador HP con procesador de 2.80 GHz, espacio de almacenamiento total de 1 TB y 16 GB de RAM.

13.2.2. Software

El software que se ha utilizado principalmente para validar los parámetros de calidad ha sido ya mencionado a lo largo de la Parte II, donde se nombran aquellos programas relacionados con el procesado de los datos. No obstante, se ha hecho uso de software adicional que incluye, entre otros, programas de ofimática y de visualización de documentos. La lista completa del software incluye:

- Consola de Windows
- Cygwin64
- Google Chrome
- Google Earth
- Hatanaka
- Matlab R2021b
- Microsoft Excel
- Microsoft Power Point
- Microsoft Word
- Pegasus 19.07.03 (Convertor, GNSS sol, MFile runner)
- WinSCP

13.2.3. Conexión a internet

La conexión a internet es necesaria en múltiples partes del proyecto. En primer lugar, la mayoría de referencias bibliográficas pueden ser consultadas de manera *online*. Asimismo, la descarga de archivos RINEX, necesarios para llevar a cabo la validación, y la descarga de programas relacionados con el proyecto, han sido posibles gracias a la conexión a internet.

En el caso concreto de este proyecto, para disponer de una conexión estable y considerablemente rápida, se optó por trabajar dentro de las instalaciones universitarias que ofrecen una velocidad inalámbrica de bajada de aproximadamente 130 Mbps, según mediciones propias.

13.2.4. Conocimientos previos

La realización del trabajo requiere conocimientos previos en sistemas GNSS y de aeronavegación. En este contexto, los documentos de la OACI toman un papel clave para la extracción de informa-

ción oficial, publicada en inglés. Experiencia previa con estos documentos es recomendada por su gran extensión y alto nivel de detalle.

En lo que a la parte informática se refiere, el manejo de Pegasus y sus módulos, así como de Hatanaka y el uso de ficheros RINEX en general, también son necesarios. El procesado de los datos puede introducir problemas que se deben solventar con un adecuada capacidad de análisis.

13.2.5. Supervisión

El proyecto debe estar supervisado por una persona o personas expertas en el ámbito de los sistemas GNSS y la aeronavegación, con experiencia constatable y satisfactoria en la supervisión de trabajos de fin de grado y máster.

Parte IV

Presupuesto

Capítulo 14

Presupuesto

14.1. Introducción

Finalmente, se puede proceder a realizar un presupuesto del trabajo realizado. Dicho presupuesto estaría compuesto por el gasto del material, licencias de software, gasto de personal y alquiler de oficina. Los costes de las Sección 14.3 y 14.4 no incluyen el Impuesto sobre el Valor Añadido a excepción de que se indique lo contrario.

A la hora de estimar el coste de los diferentes ítems se utilizarán aproximaciones razonables y el concepto de amortización. Esta amortización junto con la tasa horaria se calcula mediante las ecuaciones mostradas en (7).

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad ; \quad t_h = \frac{a}{h} \quad (7)$$

De las ecuaciones mostradas en (7), los términos se definen según:

- a : amortización (€/año)
- VC : valor de compra (€)
- VR : valor residual al finalizar el periodo de amortización (€)
- n : periodo de amortización (años)
- t_h : tasa horaria (€/h)
- h : horas trabajadas por año (h/año)

De igual modo, los precios de personal se han calculado mediante la determinación de las horas laborales que contiene un año, dadas por la Ecuación (8), y siguiendo el mismo principio de tasa horaria mostrado en la Ecuación (7).

$$\frac{\text{horas trabajadas}}{\text{año}} = \frac{\text{semanas} - \text{semanas}_{\text{no laboral}}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{semana}} \quad (8)$$

Asumiendo 52 semanas por año con 6 de vacaciones incluyendo días festivos y una jornada laboral de 40 horas a la semana, la Ecuación (8) proporciona un resultado de 1840 horas trabajadas al año.

14.2. Estado de mediciones

La realización del trabajo ha requerido de diversos recursos. En las Tablas 23, 24 y 25, se muestran los recursos referentes a equipos informáticos y software, personal, y oficina, respectivamente.

Descripción	Unidades
Licencia Cygwin64	1
Licencia Hatanaka	1
Licencia Matlab R2021b	1
Licencia Microsoft 365	1
Licencia Pegasus 19.03.06	1
Licencia WinSCP	1
Ordenador	1

Tabla 23: Conjunto de equipos informáticos y software

Descripción	Unidades
Profesor Titular	2
Ingeniero Técnico	1

Tabla 24: Personal específico para el desarrollo del proyecto

Descripción	Unidades
Oficina	1
Permisos de oficina	1
Seguro de oficina	1

Tabla 25: Oficina para el desarrollo del proyecto

14.3. Desglose de costes unitarios

14.3.1. Coste de material y software unitario

14.3.1.1. Equipo informático

En primer lugar, el coste del equipo informático incluye exclusivamente al ordenador utilizado. El coste inicial del ordenador se estima en 900 €, y se puede aproximar un valor residual del 25 % en un periodo de amortización de 4 años. Asumiendo estos valores junto con el resultado obtenido de las 1880 horas trabajadas al año, se puede obtener mediante las fórmulas en (7) los resultados que muestra la Tabla 26.

Variable	Valor
a (€/año)	168.75
t_h (€/hora)	0.092

Tabla 26: Amortización del equipo informático

14.3.1.2. Software

Considerando el valor anual de las licencias, con un periodo de amortización igual a ese mismo periodo de un año y sin valor residual posterior, se puede obtener la Tabla 27, en donde se ha tenido en cuenta que la mayoría de los programas utilizados son gratuitos, y que los proveedores de software proporcionan los precios con IVA.

Software	Coste anual con IVA (€)	Coste anual sin IVA (€)	a (€/año)	t_h (€/hora)
Cygwin64	0	0	0	0
Hatanaka	0	0	0	0
Matlab R2021b	69	57.025	57.025	0.031
Microsoft 365	69	57.025	57.025	0.031
Pegasus 19.03.06	0	0	0	0
WinSCP	0	0	0	0

Tabla 27: Coste unitario del software utilizado

14.3.2. Coste de personal cualificado unitario

De acuerdo con la Ecuación (7), asumiendo un salario bruto anual de 35000 euros al año por el profesor titular, y 22000 euros al año por el ingeniero técnico, se puede obtener la Tabla resultado 28.

Concepto	Salario bruto anual (€/año)	t_h (€/hora)
Profesor Titular	35000	19.022
Ingeniero Técnico	21000	11.413

Tabla 28: Coste unitario del personal cualificado

14.3.3. Coste de oficina unitario

El proyecto se ha realizado en la Escuela Técnica Superior de Diseño de la Universidad Politécnica de Valencia, por lo que se debe estimar el coste de alquiler de una oficina en estas instalaciones. Asumiendo un precio aproximado de 900 euros al mes, incluyendo suministros, y considerando que el coste de la misma se divide entre 4 personas, el coste por persona al mes se sitúa en 225 euros al mes.

14.4. Desglose de costes totales

Teniendo todos los costes unitarios de los diferentes conceptos, se puede hacer un desglose considerando que el proyecto se ha llevado a cabo en 4 meses con un total de 300 horas trabajadas. Esta suposición es coherente con los 12 créditos que corresponden a la asignatura para la que se realiza el documento, y supone un desempeño semanal, aproximado, de 20 horas, correspondientes a un trabajo a media jornada.

Las Tablas 29, 30 y 31 muestran los costes totales del material y software, personal y oficina, respectivamente.

14.4.1. Coste de material y software total

Concepto	t_h (€/hora)	Horas	Importe (€)
Cygwin64	0	300	0
Hatanaka	0	300	0
Matlab R2021b	0.031	300	9.30
Microsoft 365	0.031	300	9.30
Pegasus 19.03.06	0	300	0
WinSCP	0	300	0
Ordenador	0.092	300	27.51
Total			46.11

Tabla 29: Coste total del material y software utilizado

14.4.2. Coste de personal cualificado total

Concepto	t_h (€/hora)	Unidades	Horas	Importe (€)
Profesor Titular	18.617	2	15	570.65
Ingeniero Técnico	11.170	1	300	3423.91
Total				3994.57

Tabla 30: Coste total del personal cualificado**14.4.3. Coste de oficina total**

Concepto	Tasa mensual (€/mes)	Meses	Importe (€)	
Alquiler y suministros oficina		225.00	4	900.00
Total				900.00

Tabla 31: Coste total de la oficina**14.5. Resumen del presupuesto total**

Finalmente, la Tabla 32 muestra el resumen del presupuesto total, indicando el subtotal de cada concepto.

Concepto	Subtotal (€)
Coste de material y software	46.11
Coste de personal cualificado	3994.57
Coste de oficina	900.00
Base imponible	4940.68
21 % de IVA	1037.54
Presupuesto Total	5978.22

Tabla 32: Resumen del presupuesto total por conceptos

El presupuesto total asociado a la realización del presente documento asciende a CINCO MIL NOVECIENTOS SETENTA Y OCHO EUROS Y VEINTIDÓS CÉNTIMOS (5978.22 €).

Parte V

Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				-
ODS 2. Hambre cero				-
ODS 3. Salud y bienestar				-
ODS 4. Educación de calidad				-
ODS 5. Igualdad de género				-
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				-
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				-
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				-
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				-
ODS 12. Producción y consumo responsables				-
ODS 13. Acción por el clima		X		
ODS 14. Vida submarina				-
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				-
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				-
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				-

Tabla 33: Relación del trabajo con los Objetivos del Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

La posible implementación del procedimiento LPV-200 estudiado, habilitado por EGNOS, tiene una relevancia significativa en el marco de los Objetivos del Desarrollo Sostenible de la agenda 2030. Destacan especialmente los objetivos 8, 9 y 13, tal y como se muestra en la Tabla 33.

En primer lugar, los objetivos 8 y 9 están vinculados al trabajo decente, el crecimiento económico, la industria, la innovación y las infraestructuras. Su relación con el proyecto realizado se justifica con los empleos tecnológicos generados en Europa a raíz de la creación del sistema GNSS Galileo así como del sistema de aumentación EGNOS. El desarrollo de ambos ha permitido fortalecer la industria y dotar al continente de tecnología puntera. Asimismo, el programa SESAR JU también ha desempeñado un papel relevante en este contexto, al ofrecer innovaciones tecnológicas basadas en la investigación que permiten acelerar la implementación del Cielo Único Europeo, mejorando la gestión del tráfico aéreo y aumentando la eficiencia del transporte.

Del mismo modo, el objetivo 13, acción por el clima, está relacionado con el trabajo realizado por los mismos motivos. Las innovaciones proporcionadas por el programa SESAR JU contribuyen, entre otros, a crear soluciones que minimizan el impacto medioambiental de la aviación, por tanto reduciendo las emisiones a la atmósfera. Esto representa un esfuerzo significativo para abordar el cambio climático y promover la sostenibilidad en el sector aeronáutico.

Bibliografía

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Performance-based Navigation (PBN) Manual*. 4th. 9613. Montreal: ICAO, 2013. ISBN: 978-92-9249-175-8.
- [2] Hofmann-Wellenhof et al. *GNSS – global navigation satellite systems*. Springer Vienna, 2007. ISBN: 9783211730171.
- [3] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. *GPS Space Segment*. [Online]. 2022. URL: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> (visitado 10-07-2023).
- [4] Applied Consumer Center of the State Corporation 'Roscosmos'. *Sobre el sistema GLO-NASS*. [Online]. 2023. URL: https://glonass-iac.ru/spa/about_glonass/ (visitado 13-07-2023).
- [5] European Union Agency for the Space Program. *Constellation Information*. [Online]. 2023. URL: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information> (visitado 13-07-2023).
- [6] Publications Office of the European Union y European GNSS Agency. *GNSS user technology report. Issue 3, 2020*. 2020. DOI: 10.2878/565013.
- [7] China Satellite Navigation Office. *BeiDou Navigation Satellite System. Open Service Performance Standard*. Inf. téc. Versión 3.0. Mayo de 2021. URL: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf> (visitado 13-07-2023).
- [8] Cabinet Office, Government Of Japan. *QZSS Satellite Information*. [Online]. Jun. de 2023. URL: <https://qzss.go.jp/en/technical/qzssinfo/index.html> (visitado 13-07-2023).
- [9] Indian Space Research Organization (ISRO). *IRNSS Programme*. [Online]. 2023. URL: https://www.isro.gov.in/IRNSS_Programme.html (visitado 13-07-2023).
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Performance-based Navigation (PBN) Manual*. 5th. 9613. (Advance unedited). ICAO, 2023. URL: https://pbnportal.eu/dam/jcr:ca055ef7-5fa7-45e1-b4ee-7319dbc486b6/9613_unedited_en_V5.pdf (visitado 10-07-2023).

-
- [11] EUROCONTROL. *European Airspace Concept Handbook for PBN Implementation*. Handbook 1. Abr. de 2021. URL: <https://pbnportal.eu/epbn/barPages/Library.html> (visitado 10-07-2023).
- [12] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Volume I. Radio Navigation Aids*. 7th. Montreal: ICAO, 2018. ISBN: 978-92-9258-504-4.
- [13] International Civil Aviation Organization (ICAO). *ICAO Document 8168, Volume II: Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations*. 6th Edition. 8168-2. Montreal, 2014. ISBN: 978-92-9249-637-1.
- [14] European Satellite Services Provider S.A.S. *Flight Crew Basic Theoretical Training for RNP APCH down to LPV Minima*. Technical Report Issue 1.3. Abr. de 2019.
- [15] Eurocontrol. *RNP Approaches*. Factsheet. Nov. de 2019. URL: <https://pbnportal.eu/dam/jcr:5b764ca5-1845-4620-a6c4-6dfe585e4f10/Factsheet%20RNP%20Approaches.pdf> (visitado 27-05-2023).
- [16] International Civil Aviation Organization (ICAO). *ICAO Annex 6, Part II: International Aviation - Operation of Aircraft - International General Aviation - Aeroplanes*. 10th Edition. Annex 6, Part II. Montreal, 2018. ISBN: 978-92-9265-282-1.
- [17] ICAO EUROPE. *Guidance Material for the Implementation of RNP Approach Operations*. Technical Report EUR Doc 025. Ver. 2.0. EUROCONTROL, ene. de 2021.
- [18] ESSP. *Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation*. Inf. téc. Sep. de 2015. URL: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/LPV_Implementation_Guidelines_Airports_Operators_0.pdf (visitado 30-06-2023).
- [19] European Commission. *Single European Sky*. [Online]. 2023. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky_en (visitado 16-06-2023).
- [20] International Civil Aviation Organization. *Guide for Ground Based Augmentation System Implementation*. Manual. Mayo de 2013. URL: <https://www.icao.int/sam/edocuments/gbasguide.pdf> (visitado 10-07-2023).
- [21] Federal Aviation Administration. *Satellite Navigation - GBAS - How it works*. [Online]. 2020. URL: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks (visitado 10-07-2023).
- [22] European Union Agency for the Space Programme. *About EGNOS*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/egnos-system/about-egnos> (visitado 27-04-2023).

-
- [23] SBAS IWG. *SBAS services global status and plans*. [Online]. Dic. de 2021. URL: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/sites/default/files/workshop2021/pdfs/6_SBAS/EWS21_P17_SBAS%20global%20service%20status%20and%20plans.pdf (visitado 13-07-2023).
- [24] SBAS. *SBAS Worldwide*. [Online]. Feb. de 2021. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-12/SBAS_Worldwide_quick_facts.pdf (visitado 13-07-2023).
- [25] Federal Aviation Administration. *Satellite Navigation - WAAS - How It Works*. [Online]. 2023. URL: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks (visitado 31-05-2023).
- [26] Federal Aviation Administration. *Satellite Navigation — GPS/WAAS Approaches*. [Online]. 2023. URL: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/approaches (visitado 27-04-2023).
- [27] International Civil Aviation Organization. *MSAS STATUS AND FUTURE PLAN*. Working Paper. Information Paper. Montréal, Canada: ICAO, oct. de 2018. URL: https://www.icao.int/Meetings/anconf13/Documents/WP/wp_249_en.pdf (visitado 10-07-2023).
- [28] Tim Schempp. *GAGAN Regional Service Availability*. Unpublished Work. Presented at the GBAS/SBAS Implementation Workshop. Seoul, Republic of Korea: Airports Authority of India (AAI), jun. de 2019. URL: [https://www.icao.int/APAC/APAC-RSO/GBASSBAS%20Implementation%20Workshop/3-7_GAGAN_Regional_Service_Availability%20\(T%20Schempp\).pdf](https://www.icao.int/APAC/APAC-RSO/GBASSBAS%20Implementation%20Workshop/3-7_GAGAN_Regional_Service_Availability%20(T%20Schempp).pdf) (visitado 10-07-2023).
- [29] Interoperability Working Group (IWG). *Global SBAS Status*. [Online]. Nov. de 2021. URL: <https://www.faa.gov/ato/navigation-programs/global-sbas-status> (visitado 27-05-2023).
- [30] Ministry of Science e ICT. *KPS KAAS Update*. [Online]. Sep. de 2022. URL: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2022/kim.pdf> (visitado 27-05-2023).
- [31] Australian Government. *Southern Positioning Augmentation Network (SouthPAN)*. [Online]. Mayo de 2023. URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/positioning-australia/about-the-program/southpan> (visitado 27-05-2023).
- [32] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *EGNOS Safety of Life (SoL). Service Definition Document*. Inf. téc. European GNSS Agency, 2021. URL: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf (visitado 10-07-2023).
- [33] European Union Agency for the Space Programme. *About SoL*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-%20user-support.essp-sas.eu/services/about-sol> (visitado 27-04-2023).
-

-
- [34] EGNOS. *Potential EGNOS underperformance linked to new EGNOS RIMS configuration*. Service Notice 024. Mar. de 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/service-notice-24-potential-egnos-underperformance-linked-new-egnos-rims-configuration> (visitado 10-07-2023).
- [35] EGNOS. *EGNOS Space Segment Updates in the First Quarter of 2020*. Service Notice 022. Mar. de 2020. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/service-notice-22-egnos-space-segment-updates-first-quarter-2020> (visitado 10-07-2023).
- [36] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). *Solar Cycle Progression*. [Online]. 2023. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (visitado 18-05-2023).
- [37] EGNOS. *Potential EGNOS underperformance due to Solar Cycle*. Service Notice 025. Mayo de 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/service-notice-25-potential-egnos-underperformance-due-solar-cycle> (visitado 10-07-2023).
- [38] Denise Hill. *Sun releases strong solar flare*. [Online]. 2023. URL: <https://blogs.nasa.gov/solarcycle25/2023/03/> (visitado 10-07-2023).
- [39] EGNOS User Support. *PL PE PLOTS*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/pl-pe-plots> (visitado 31-05-2023).
- [40] Agencia Espacial Europea (ESA). *Upgraded monitoring stations point way to better satnav - sharpening EGNOS*. [Online]. 2017. URL: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Upgraded_monitoring_stations_point_way_to_better_satnav-sharpening_EGNOS (visitado 25-05-2023).
- [41] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *FACTSHEET*. [Online]. 2019. URL: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/uploads/egnos_factsheet.pdf (visitado 27-05-2023).
- [42] ESSP SAS. *Service Provision Yearly Report (April 2015 - March 2016)*. Inf. téc. ESSP-DRD-17128P Iss. 01-00. Jul. de 2016. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/sites/default/files/documents/EGNOS%20Service%20Provision%20Yearly%20Report%202015%20-%202016.pdf>.
- [43] European Union Agency for the Space Programme. *LPV Procedures Map*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/resources-tools/lpv-procedures-map> (visitado 25-04-2023).
- [44] GMV. *First use of EGNOS in civil aviation*. [Online]. Oct. de 2013. URL: <https://www.gmv.com/en/communication/news/first-use-egnos-civil-aviation> (visitado 20-06-2023).
-

-
- [45] Pierre Ladoux y Benoit Roturier. *GBAS implementation status: international context and situation in France*. ICAO ACAC Workshop, Rabat, 7-9 November 2017. [Online]. France: Direction générale de l'Aviation civile, 2017. URL: <https://www.icao.int/MID/Documents/2017/ACAC-ICAO%20GNSS%20Workshop/GBAS%20status%20ACAC.pdf> (visitado 20-06-2023).
- [46] ENAIRE. *ENAIRE, pionera en tecnología satelital GBAS, explica el proyecto para Madrid-Barajas*. [Online]. Oct. de 2021. URL: https://www.enaire.es/es_ES/2021_10_27/ndp_proyecto-para-madrid-barajas (visitado 27-05-2023).
- [47] ENAIRE. *AIP ESPAÑA: Servicio de Información Aeronáutica. PARTE 3 - AERÓDROMOS (AD)*. [Online]. Jun. de 2023. URL: <https://aip.enaire.es/AIP/#AD> (visitado 22-06-2023).
- [48] DFS Deutsche Flugsicherung. *AIP IFR Online*. [Online]. Jul. de 2023. URL: <https://aip.dfs.de/basicAIP/> (visitado 14-07-2023).
- [49] SESAR Joint Undertaking. *World premiere at Frankfurt Airport: satellite-based precision landings possible even in bad weather*. [Online]. Ago. de 2022. URL: <https://www.sesarju.eu/news/world-premiere-frankfurt-airport-satellite-based-precision-landings-possible-even-bad-weather> (visitado 27-05-2023).
- [50] SESAR Joint Undertaking. *Demonstration Of Runway Enhanced Approaches Made with Satellite Navigation*. [Online]. 2022. URL: <https://www.sesarju.eu/projects/DREAMSVLD> (visitado 27-05-2023).
- [51] SESAR Joint Undertaking. *ABOUT SESAR: Discover SESAR*. [Online]. 2023. URL: <https://www.sesarju.eu/discover-sesar> (visitado 31-05-2023).
- [52] Single European Sky ATM Research 3 Joint Undertaking. *SESAR solutions catalogue 2021*. Publications Office of the European Union, 2022. DOI: 10.2829/400884.
- [53] SESAR Joint Undertaking. *Airborne navigation capability to achieve LPV-100/CAT II approach*. [Online]. 2023. URL: <https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/airborne-navigation-capability-achieve-lpv-100cat-ii-approach> (visitado 25-05-2023).
- [54] Werner Gurtner. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. Inf. téc. Astronomical Institute, University of Berne, dic. de 2007. URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt> (visitado 10-07-2023).
- [55] RINEX Working Group International GNSS Service (IGS) y Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104). *RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.04*. Inf. téc. Nov. de 2018. URL: <http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf> (visitado 10-07-2023).

-
- [56] European Satellite Services Provider. *EGNOS User Support Website - EDAS Service Downloads*. [Online]. (Se requiere autorización para acceder al contenido). 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/edas-service/downloads> (visitado 20-06-2023).
- [57] Instituto Geográfico Nacional. *Descarga de ficheros RINEX*. [Online]. 2023. URL: <https://www.ign.es/web/gds-gnss-datos-rinex> (visitado 10-07-2023).
- [58] International Civil Aviation Organization (ICAO). *ICAO Document 9906, Volume V: Quality Assurance Manual for Flight Procedure Design*. 1st Edition. 9906-5. Montreal, 2012. ISBN: 978-92-9231-996-0.
- [59] David Duchet et al. *PEGASUS*Plus: A frame for GNSS Data Evaluation*. [Online]. 2002. URL: http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/3rd%20ESTB%20workshop/navsat2002_pplus%20Duchet.pdf (visitado 31-05-2023).
- [60] AENA. *Informe Anual 2022. Fechas e Informes Estadísticos*. [Online]. 2023. URL: <https://www.aena.es/es/estadisticas/informes-anuales.html#> (visitado 27-04-2023).
- [61] Red de Infraestructuras Geodésicas. *Reseña de Estación Permanente - ERGNSS*. Inf. téc. Instituto Nacional Geográfico, 2023. URL: <https://datos-geodesia.ign.es/ERGNSS/fichas/SNTG.pdf> (visitado 10-07-2023).
- [62] AIP España. *LEST AD 2 - Aerodrome Data*. Inf. téc. Nov. de 2022. URL: https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEST/LE_AD_2_LEST_en.pdf (visitado 20-06-2023).
- [63] European GNSS Agency. *EGNOS User Support - LPV200 Availability*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/lpv200-availability> (visitado 10-07-2023).
- [64] European GNSS Agency. *EGNOS User Support - LPV200 Continuity*. [Online]. (Se requiere iniciar sesión). 2023. URL: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/lpv200-continuity?check_logged_in=1 (visitado 10-07-2023).
- [65] GNSS Tools Team Eurocontrol. *PEGASUS. Software Manual*. Software User Manual PEG-SUM-01. Eurocontrol, dic. de 2011.
- [66] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, February 2023*. Inf. téc. 143. European GNSS Agency, 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/143-monthly-performance-report-march-2023> (visitado 13-07-2023).
- [67] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, October 2022*. Inf. téc. 138. European GNSS Agency, 2022. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/138-monthly-performance-report-october-2022> (visitado 13-07-2023).
-

-
- [68] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, November 2022*. Inf. téc. 139. European GNSS Agency, 2022. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/139-monthly-performance-report-november-2022> (visitado 13-07-2023).
- [69] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, December 2022*. Inf. téc. 140. European GNSS Agency, 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/140-monthly-performance-report-december-2022> (visitado 13-07-2023).
- [70] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, January 2023*. Inf. téc. 141. European GNSS Agency, 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/141-monthly-performance-report-january-2023> (visitado 13-07-2023).
- [71] ESSP SAS. *Monthly Performance Report, February 2023*. Inf. téc. 142. European GNSS Agency, 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents/142-monthly-performance-report-february-2023> (visitado 13-07-2023).
- [72] EGNOS User Support. *AVAILABILITY, ACCURACY AND INTEGRITY PERFORMANCE*. [Online]. 2023. URL: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/availability-accuracy-and-integrity-performance> (visitado 31-05-2023).
- [73] Boletín Oficial del Estado. *Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización*. BOE número 97. Abr. de 1997. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/488/con> (visitado 13-07-2023).