



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

ANÁLISIS A NIVEL INTERNACIONAL DE LA
INTEGRACIÓN DEL SBAS PARA LA NAVEGACIÓN
AÉREA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Belda Cambra, Miguel

Tutor/a: Quintanilla García, Israel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Aeroespacial

ANÁLISIS A NIVEL INTERNACIONAL DE LA INTEGRACIÓN DEL SBAS EN LA NAVEGACIÓN AÉREA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Autor: Belda Cambra, Miguel

Tutor: Quintanilla García, Israel

Curso Académico: 2022/2023

*A mi familia por su gran apoyo.
Con especial cariño, a mi hermana
y mi abuela.*

Resumen

En este documento se realiza un análisis del nivel de uso que tienen los sistemas SBAS en las dos principales potencias económicas a nivel global: Europa y Estados Unidos. Para ello se verifica el nivel de implementación de los procedimientos de aproximación CAT I que utilizan SBAS (aproximaciones LPV) en cada territorio. Se muestra además un ejemplo práctico de cómo se realiza parte del proceso de validación de un procedimiento LPV-200 para el aeropuerto de Ibiza (LEIB). Esta validación se realiza con el software *PEGASUS* de EUROCONTROL y con ayuda de datos de la web de EGNOS y del IGN. El objetivo es comprobar que se cumplen los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad que la OACI exige. Por tanto, previamente se da un contexto teórico en el que se explican los conceptos de espacio aéreo y PBN, así como el funcionamiento de las constelaciones GNSS y los sistemas SBAS.

Palabras clave: PBN, GNSS, SBAS, EGNOS, WAAS, PEGASUS.

Abstract

This document analyzes the use of the SBAS systems in the two main global economic powers: Europe and the United States. To do this, it is verified the level of implementation of each territory of the CAT I approach procedures that use SBAS (LPV approaches). It is also shown a practical example of how part of the validation process is done for a LPV-200 procedure for the Ibiza airport (LEIB). This validation is carried out with the *PEGASUS* software of EUROCONTROL and with the help of some data from the EGNOS and the IGN websites. The objective is to verify that the requirements of accuracy, integrity, continuity and availability which ICAO establishes are met. Therefore, a theoretical context is previously given in which the concepts of airspace and PBN are explained, as well as the functioning of the GNSS constellations and the SBAS systems.

Keywords: PBN, GNSS, SBAS, EGNOS, WAAS, PEGASUS.

Índice general

Resumen	V
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
Acrónimos	XXV
I Memoria	1
1. Planteamiento del trabajo	3
1.1. Introducción	3
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Estructura	5
2. Concepto de espacio aéreo de la OACI	7
2.1. Comunicación	8
2.2. Navegación	10
2.3. Vigilancia	10
2.4. ATM	12
2.4.1. SESAR	15
2.4.2. NextGen	17
2.4.3. Armonización de los programas SESAR y NextGen	19
3. Performance Based Navigation (PBN)	21

3.1.	Antecedentes	21
3.1.1.	Desafíos y limitaciones de los sistemas de navegación anteriores	22
3.1.2.	Transición hacia la PBN	23
3.2.	Requisitos de la PBN	24
3.2.1.	Precisión	25
3.2.2.	Integridad	25
3.2.3.	Continuidad	29
3.2.4.	Disponibilidad	31
3.3.	Concepto de PBN de la OACI	31
3.3.1.	La especificación de navegación	32
3.3.2.	La aplicación de navegación	41
3.3.3.	La infraestructura NAVAID	41
4.	GNSS	43
4.1.	Principio de funcionamiento	43
4.2.	Sistemas GNSS	50
4.2.1.	Galileo	51
4.2.2.	GPS	57
4.2.3.	GLONASS y BeiDou	61
4.3.	Ventajas y limitaciones	63
4.4.	Aumentaciones	65
4.4.1.	ABAS	66
4.4.2.	GBAS	66
5.	Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS)	69
5.1.	Arquitectura	71
5.2.	Principio matemático de funcionamiento	72
5.3.	Sistemas SBAS	74
5.3.1.	EGNOS	74
5.3.2.	WAAS	88
5.3.3.	Comparativa integración EGNOS y WAAS	97

6. Validación	99
6.1. Proceso de validación	100
6.2. Validación a largo plazo	100
6.2.1. Disponibilidad	101
6.2.2. Continuidad	102
6.2.3. Precisión	102
6.2.4. Integridad	103
6.2.5. Conclusión largo plazo	103
6.3. Validación a corto plazo	103
6.3.1. Recopilación y preprocesado de datos	104
6.3.2. Procesado de datos con <i>PEGASUS</i>	105
6.3.3. Resultados	107
6.3.4. Conclusiones corto plazo	111
7. Conclusión	113
7.1. Trabajos futuros	114
II Pliego de condiciones	117
1. Condiciones generales	119
1.1. General	119
1.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	120
2. Especificaciones técnicas	127
2.1. Especificaciones de materiales y equipos	127
2.1.1. Hardware	127
2.1.2. Software	127
2.1.3. Conexión a Internet	128
2.1.4. Conocimientos previos	128
2.1.5. Conocimientos informáticos	128
2.1.6. Supervisión	128
2.2. Condiciones de calidad	129

III Presupuesto	131
1. Presupuesto	133
1.1. Introducción	133
1.2. Desglose de los costes unitarios	133
1.3. Presupuesto total	135
 Anexo I - Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030	 138
 Bibliografía	 141

Índice de figuras

2.1. Concepto de espacio aéreo de la OACI [1].	7
2.2. Cuota de mercado de los diferentes sectores de la aviación [2].	14
2.3. Pasado y pronóstico de aumento de pasajeros en billones de pasajeros [3].	14
2.4. Pasado y pronóstico de aumento de vuelos en Europa en millones de vuelos [4].	15
2.5. Retraso medio en la gestión de afluencia de tráfico aéreo por vuelo [5].	16
2.6. Tecnología que permite la evolución hacia nuevos procedimientos con el programa NextGen [6].	18
3.1. Navegación convencional [7].	22
3.2. Navegación de Área (RNAV) [7].	23
3.3. Nivel de Protección Vertical y Horizontal [8].	26
3.4. Diagrama de Stanford para integridad [8].	27
3.5. Gráfica sobre el plano horizontal del caso en el que el sistema se encuentra operando en la zona nominal [9].	29
3.6. Componentes de la PBN según la OACI [1].	31
3.7. Posible secuencia de especificaciones de navegación usadas en diferentes partes de un vuelo [10].	32
3.8. Especificaciones de navegación reguladas por OACI [10].	33
3.9. Errores laterales de navegación (95 %) [10].	33
3.10. Errores longitudinales de navegación (95 %) [10].	35
3.11. Monitorización de cada error según la especificación y efecto de estos sobre el error total (TSE) [10].	35
3.12. Precisión lateral de RNAV 10 [11].	37
3.13. Precisión lateral de RNP 4 [11].	37
3.14. Clasificación de los procedimientos de aproximación [12, 13].	39

4.1. Determinación del tiempo de propagación de la señal por correlación del código [14].	45
4.2. Determinación del tiempo de propagación de la señal por diferencia de fase.	46
4.3. Errores que afectan a la pseudodistancia [15].	49
4.4. Bandas de frecuencia de los sistemas GNSS [16].	51
4.5. Frecuencias de transmisión de Galileo y GPS [17].	54
4.6. Estaciones terrestres de Galileo [18].	55
4.7. Estaciones terrestres de GPS [19].	60
4.8. Mejora de la precisión tras la desactivación de la S/A [20].	61
5.1. Áreas de servicio de los diferentes SBAS ¹ [21].	70
5.2. Área de cobertura durante el test del satélite PRN 123 [22].	75
5.3. Área de cobertura durante el test del satélite PRN 126 [22].	75
5.4. Distribución actual de las 39 estaciones RIMS [23].	76
5.5. Arquitectura de EGNOS [23].	78
5.6. Disponibilidad para procedimientos APV-I [23].	80
5.7. Continuidad para procedimientos APV-I [23].	80
5.8. Disponibilidad para procedimientos LPV-200 [23].	80
5.9. Continuidad para procedimientos LPV-200 [23].	80
5.10. Disponibilidad para procedimientos NPA [23].	81
5.11. Continuidad para procedimientos NPA [23].	81
5.12. Mapa de aeropuertos y helipuertos con procedimientos LPV operativos o planificados [24].	82
5.13. Porcentaje de operaciones activas por país ² sobre el total de operaciones activas europeo.	83
5.14. Porcentaje de operaciones LPV-200 activas por país ³ sobre el total de LPV-200 activas europeo.	84
5.15. Operaciones LPV-200 sobre el total de operaciones activas.	85
5.16. Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV activos.	85
5.17. Aeropuertos con procedimientos LPV activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada país.	86
5.18. Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada país.	86

5.19. Aeronaves con habilitación para procedimientos LPV.	87
5.20. Porcentaje de operadores con alguna aeronave habilitada para procedimientos LPV.	87
5.21. Área de cobertura de la Zona 1 de WAAS [25].	88
5.22. Área de cobertura de la Zona 2 de WAAS [25].	88
5.23. Área de cobertura de la Zona 3 de WAAS [25].	89
5.24. Área de cobertura de la Zona 4 de WAAS [25].	89
5.25. Área de cobertura de WAAS [25].	89
5.26. Huella de cobertura de los satélites GEO de WAAS [26].	89
5.27. Segmento tierra del sistema WAAS [25].	90
5.28. Disponibilidad de WAAS para dar soporte a procedimientos LPV [27].	92
5.29. Disponibilidad de WAAS para dar soporte a procedimientos LPV-200 [27].	92
5.30. Porcentaje de operaciones activas por estado ⁴ sobre el total de operaciones activas estadounidense.	93
5.31. Porcentaje de operaciones LPV-200 activas por estado ⁴ sobre el total de LPV-200 activas estadounidense.	93
5.32. Operaciones LPV-200 sobre el total de operaciones activas.	94
5.33. Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV activos.	95
5.34. Aeropuertos con procedimientos LPV activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada estado.	95
5.35. Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada estado.	96
5.36. Procedimientos LPV planificados en Europa.	98
6.1. Proceso de descompresión .crx a .rnx.	104
6.2. Archivos a analizar.	105
6.3. Interfaz del programa <i>Convertor</i> de <i>PEGASUS</i>	105
6.4. Interfaz del programa <i>GNSS_Solution</i> de <i>PEGASUS</i>	106
6.5. Interfaz del programa <i>M-File Runner</i> de <i>PEGASUS</i>	106
6.6. Índice de seguridad horizontal para el día 06/07/23.	108
6.7. Índice de seguridad vertical para el día 06/07/23.	108
6.8. Índice de seguridad horizontal para el día 07/07/23.	108

6.9. Índice de seguridad vertical para el día 07/07/23.	108
6.10. Índice de seguridad horizontal para el día 08/07/23.	108
6.11. Índice de seguridad vertical para el día 08/07/23.	108
6.12. Diagrama de Stanford horizontal para el día 06/07/23.	109
6.13. Diagrama de Stanford vertical para el día 06/07/23.	109
6.14. Diagrama de Stanford horizontal para el día 07/07/23.	109
6.15. Diagrama de Stanford vertical para el día 07/07/23.	109
6.16. Diagrama de Stanford horizontal para el día 08/07/23.	109
6.17. Diagrama de Stanford vertical para el día 08/07/23.	109
6.18. Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 06/07/23 [28].	110
6.19. Continuidad del GEO PRN 136 el día 06/07/23 [29].	110
6.20. Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 07/07/23 [28].	110
6.21. Continuidad del GEO PRN 136 día 07/07/23 [29].	110
6.22. Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 08/07/23 [28].	110
6.23. Continuidad del GEO PRN 136 el día 08/07/23 [29].	110

Índice de tablas

4.1. Características de los primeros satélites operativos de la constelación Galileo.	52
4.2. Características de los satélites de la última fase de lanzamiento de la constelación Galileo	53
4.3. Señales de Galileo [16].	54
4.4. Precisión, disponibilidad e integridad de los diferentes servicios de Galileo [30, 31, 32].	57
4.5. Señales de GPS [33].	58
4.6. Satélites GPS [34].	59
4.7. Precisión, disponibilidad e integridad de los diferentes servicios de GPS [35].	61
4.8. Comparativa del segmento espacio de las diferentes constelaciones [36, 34, 37, 38, 39].	62
4.9. Precisión, disponibilidad e integridad de GLONASS y BeiDou [40, 41].	63
4.10. Requisitos de rendimientos por operación. [42]	65
5.1. Valores de rendimiento del servicio SoL de EGNOS [23].	79
5.2. Valores de rendimiento de WAAS [25].	91
5.3. Medias europea y estadounidense de aeropuertos con procedimientos LPV y LPV-200 sobre el total de aeropuertos de cada país/estado.	96
5.4. País/estado con mayor porcentaje de procedimientos.	97
5.5. Medias relativas a procedimientos LPV-200.	97
5.6. Media de aeropuertos con el procedimiento indicado sobre total de aeropuertos comerciales del país/estado.	97
6.1. Requisitos de rendimientos para operaciones LPV. [42]	100
6.2. Disponibilidad de EGNOS SIS en los GEO [43, 44].	101
6.3. Disponibilidad de operaciones LPV-200 [43, 44, 45, 46, 47, 48].	101

6.4.	Riesgo de continuidad en operaciones LPV-200 [43, 44, 45, 46, 47, 48].	102
6.5.	Valores de precisión en la RIMS PDM [43, 44, 45, 46, 47, 48].	102
6.6.	Valores de los índices de seguridad vertical y horizontal [43, 44, 45, 46, 47, 48]. .	103
6.7.	Valores de precisión horizontal y vertical.	107
6.8.	Valores del índice de seguridad horizontal y vertical.	107
1.1.	Costes de hardware.	133
1.2.	Costes de software.	134
1.3.	Costes de personal.	134
1.4.	Presupuesto total.	135
1.1.	Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030	139

Acrónimos

A-RNP	Advanced RNP.
ABAS	Aircraft Based Augmentation System.
ADS	Automatic Dependent Surveillance.
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast.
AeroMACS	Aeronautical Mobile Airport Communication System.
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea.
AFSCN	Air Force Satellite Control Network.
AL	Alert Limit.
ANGA	Augmented Navigation for Africa.
ANSP	Air Navigation Service Provider.
APV	Approach with Vertical Guidance.
AR	Authorisation Required.
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Service.
ARP	Airport Reference Point.
ASECNA	Agency for Aerial Navigation Safety in Africa and Madagascar.
ASM	Airspace Management.
ASQF	Application Specific Qualification Facility.
ATC	Air Traffic Control.
ATCO	Air Traffic Controllers.
ATFM	Air Traffic Flow Management.
ATM	Air Traffic Management.
ATN	Aeronautical Telecommunication Network.
ATS	Air Traffic Service.

BDSBAS	BeiDou SBAS.
C/A	Coarse/Acquisition.
CAS	Commercial Authentication Service.
CCF	Central Control Facility.
CDMA	Code Division Multiple Access.
CNS	Communication, Navigation and Surveillance.
CONUS	Contiguous United States.
COVID-19	Coronavirus Disease 2019.
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communications.
CPF	Central Processing Facilities.
CS	Control Segment.
DA/H	Decision Altitude/Height.
DME	Distance Measuring Equipment.
DSS	Decision Support System.
ECAC	European Civil Aviation Conference.
EDAS	EGNOS Data Access Service.
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service.
EOL	End Of Life.
ERGNSS	Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS.
ESA	European Space Agency.
ESSP	European Satellite Services Provider.
EWAN	EGNOS Wide Area Network.
FAA	Federal Aviation Administration.
FANS	Future Air Navigation Systems.
FCI	Future Communications Infrastructure.
FDE	Fault Detection and Exclusion.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
FMS	Multi-sensor Flight Management System.
FOC	Full Operational Capability.

FOSA	Flight Operational Safety Assessment.
FRT	Fictitious Threshold Point.
FTE	Flight Technical Error.
GAGAN	GPS Aided GEO Augmented Navigation.
GBAS	Ground Based Augmentation System.
GCC	Galileo Control Centre.
GCS	Galileo Control Segment.
GEO	Geostationary Earth Orbit.
GES	Ground Earth Station.
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element.
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error.
GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System.
GMS	Galileo Mission Segment.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System.
GS	Ground Segment.
GSS	Ground Sensor Station.
GUS	Ground Uplink Station.
HAL	Horizontal Alert Limit.
HAS	High Accuracy Service.
HMI	Hazardously Misleading Information.
HNSE	Horizontal Navigation System Error.
HP	High Precision.
HPE	Horizontal Position Error.
HPL	Horizontal Protection Level.
HSI	Horizontal Security Index.
IATA	International Air Transport Association.
IFP	Instrument Flight Procedure.
IFR	Instrumental Flight Rules.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.

IGSO	Inclined Geo-Synchronous Orbit.
ILS	Instrumental Landing System.
INS	Inertial Navigation System.
IOC	Initial Operational Capability.
IOV	In-Orbit Validation.
IPS	Internet Protocol Suite.
IR	Integrity Risk.
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System.
IRS	Inertial Reference System.
ITU	International Telecommunications Union.
JPDO	Joint Planning and Development Office.
KAAS	Korea Augmentation Satellite System.
LDACS	L-band Digital Aeronautical Communication System.
LNAV	Lateral Performance.
LOS	Line-Of-Sight.
LP	Localizer Performance.
LPV	Localizer Performance with Vertical guidance.
LRNS	Long Range Navigation System.
MAP	Missed Approach Point.
MCC	Mission Control Centres.
MDA/H	Minimum Descent Altitude/Height.
MEO	Medium Earth Orbit.
MI	Misleading Information.
MLAT	Multilateración.
MLS	Microwave Landing System.
MNPS	Minimum Navigation Performance Specifications.
MSAS	Multifunctional Satellite Augemntation System.
NAS	National Airspace System.
NAVAID	Navigation Aid.

NDB	Non-Directional Beacon.
NewPENS	New pan-European Network Service.
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency.
NLES	Navigation Land Earth Stations.
NM	Nautic Mile.
NOCC	National Operations and Control Center.
NPA	Non Precision Approach.
NSE	Navigation System Error.
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional.
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
OM	Operations and Maintenance.
OS	Open Service.
OSNMA	Open Service Navigation Message Authentication.
PA	Precision Approach.
PACF	Performance Assessment and Checkout Facility.
PANS-OPS	Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations.
PBN	Performance Based Navigation.
PDE	Path Definition Error.
PE	Position Error.
PL	Protection Level.
PPS	Precise Positioning Service.
PRC	Pseudorange Corrections.
PRN	Pseudo-Random Noise.
PRS	Public Regulated Service.
PSE	Path Steering Error.
PSR	Primary Surveillance Radar.
PVD	Pantalla de Visualización de Datos.
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System.
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring.

RF	Radius to Fix.
RIMS	Ranging Integrity Monitoring Stations.
RINEX	Receiver INdependent EXchange.
RMS	Root Mean Square.
RNAV	Navegación de Área.
RNCP	Required Navigation Performance Capability.
RNP	Required Navigation Performance.
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System.
RRC	Rangerate Corrections.
S/A	Selective Availability.
SAR	Search And Rescue service.
SARP	Standards and Recommended Practices.
SATCOM	SATellite COMmunications.
SBAS	Satellite Based Augmentation System.
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring.
SES	Single European Sky.
SESAR	Single European Sky ATM Research.
SI	Security Index.
SID	Standard Departurte.
SIS	Signal in Space.
SoL	Safety of Life.
SouthPAN	Southern Positioning Augmentation Network.
SP	Standard Precision.
SPS	Standard Positioning Service.
SS	Space Segment.
SSR	Secondary Surveillance Radar.
STAR	Standard Arrival.
SWIM	System Wide Information Management.
TBFM	Time Based Flow Management.
TBO	Trajectory-Based Operations.

TCN	Terrestrial Communications Network.
TDOA	Time Difference Of Arrival.
TFDM	Terminal Flight Data Manager.
TFMS	Traffic Flow Management System.
TSE	Total System Error.
TTA	Time To Alert.
TTCF	Telemetry, Tracking and Command.
UAS	Unmanned Aircraft System.
UDRE	User Differential Range Error.
UHF	Ultra High Frequency.
ULS	Uplink Station.
US	User Segment.
UTC	Universal Time Coordinated.
UTM	UAS Traffic Management.
VAL	Vertical Alert Limit.
VFR	Visual Flight Rules.
VHF	Very High Frequency.
VNAV	Vertical Navigation.
VNSE	Vertical Navigation System Error.
VOR	VHF Omni-Directional Radio Range.
VPL	Vertical Protection Level.
VSI	Vertical Security Index.
WAAS	Wide Area Augmentation System.
WGS-84	World Geodetic System - 1984.
WMS	Wide-area Master Station.
WPT	Waypoint.
WRE	Wide-area Reference Equipment.
WRS	Wide-area Reference Station.

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Planteamiento del trabajo

1.1. Introducción

El creciente sector aeronáutico requiere de procedimientos cada vez más precisos. Desde que surgió la aviación, la navegación aérea ha evolucionado de forma que, en la actualidad, son pocos los vuelos que utilizan reglas visuales (VFR), pues la aviación comercial y militar usan en la gran mayoría de casos las reglas de vuelo instrumentales (IFR). Estas técnicas de navegación por instrumentos han ido mejorando, con cada vez mayor precisión y mayor número de requisitos.

De este modo, la navegación está en proceso de evolución hacia una navegación basada en requisitos (PBN) en todas las fases del vuelo. La evolución está encaminada hacia una navegación aérea que se sustente de forma mayoritaria en los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) como principal ayuda a la navegación (NAVAID).

Para poder implementar estos avances y hacer uso de los sistemas GNSS, es necesario cumplir con los requisitos que la OACI exige. Para ello, el sistema de aumentación SBAS juega un papel clave, pues se encarga de proporcionar mayor precisión a la señal GNSS, además de dotarla de integridad y mayor disponibilidad, lo que permite que se puedan habilitar procedimientos PBN, que se nutren de los GNSS, para aproximación.

En este documento, pues, además de explicar en que consisten estos conceptos y analizar el estado del arte del sistema SBAS, se hace una simulación de parte del proceso de validación para un procedimiento de aproximación LPV-200 en el aeropuerto de Ibiza (LEIB) en España.

1.2. Motivación

El interés en este campo surgió a raíz de asignaturas como *Navegación Aérea*, *Cartografía y Cosmografía* y *Gestión del Espacio Aéreo II*, en las cuales ya se mostró el proceso de transición que el espacio aéreo y la navegación aérea atraviesan en la actualidad, encontrándose en una migración hacia la navegación basada en GNSS e integrándose en la PBN.

Es indiscutible la importancia que tienen las constelaciones GNSS en la actualidad y cuántas aplicaciones tienen en sectores como el ferroviario, aéreo, marítimo, agrícola, de rescate y salvamento... De todas estas aplicaciones, surge el interés de comprobar como estos relativamente nuevos sistemas están cambiando la aviación. A todo ello se le suma la oportunidad que este proyecto representa para asentar todos los conocimientos relativos al espacio aéreo y la navegación.

La PBN ya es usada en muchas fases de los vuelos. No obstante, para aproximación, los procedimientos basados en PBN requieren del SBAS y están en proceso de habilitación e implantación. Resulta de interés un análisis que compare los diferentes niveles de implementación que los procedimientos de aproximación que utilizan SBAS tienen en los diferentes territorios.

1.3. Objetivos

Este proyecto quiere profundizar en el papel que juega el SBAS en esta nueva etapa de la navegación aérea y descubrir en qué niveles de integración se encuentra, así como analizar el estado del arte actual del sistema.

Para ello:

- Se realiza un análisis de la composición del concepto del espacio aéreo de la OACI.
- Se repasa la navegación basada en requerimientos (PBN) para comprender los requisitos que OACI exige.
- Se presentan los sistemas GNSS como elemento integrador para todas las fases del vuelo y se comprueba como estos sistemas no cumplen los requisitos de la OACI.
- Se introduce el sistema SBAS como elemento que ayuda a cumplir con los requisitos y permite la validación de procedimientos de aproximación.
- Se realiza un análisis de los principales sistemas SBAS: el europeo y el estadounidense.
- Se analizan los niveles de integración del sistema SBAS europeo (EGNOS) y del estadounidense (WAAS).
- Se realiza parte de un proceso de validación para un procedimiento de aproximación LPV-200 en el aeropuerto de Ibiza (LEIB).

1.4. Estructura

El proyecto que realizará el análisis de lo anteriormente mencionado queda dividido de la siguiente forma:

Parte I. Memoria

En el primer capítulo, *Planteamiento del trabajo*, se realiza una introducción y breve descripción de lo que tratará el proyecto.

En el segundo capítulo, *Concepto de espacio aéreo de la OACI*, se explican los diferentes componentes que conforman el concepto de espacio aéreo de la OACI, mencionando las evoluciones futuras y haciendo especial hincapié en el caso de la gestión del tráfico aéreo (ATM), del que se explican los proyectos de futuro SESAR y NextGen.

En el tercer capítulo, *Performance Based Navigation (PBN)*, se repasa el pasado de la navegación y como ha ido evolucionando hasta el día de hoy. Se explican los requisitos de la PBN y se detalla el concepto de PBN de la OACI, conformado por la especificación de navegación, la aplicación de navegación y la infraestructura NAVAID.

En el cuarto capítulo, *GNSS*, se habla sobre el estado del arte de los sistemas globales de navegación por satélite, se explica su fundamento matemático y se muestran las diferencias entre los distintos sistemas operativos en la actualidad.

En el quinto capítulo, *Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS)*, se profundiza en el funcionamiento de estos sistemas y se muestra las diferencias entre los principales. Se presenta también un análisis de la integración de cada uno de ellos en su respectivo territorio.

En el sexto capítulo, *Validación*, se realiza el proceso de validación en tierra a corto y largo plazo para un procedimiento LPV-200 en el aeropuerto de Ibiza (LEIB).

En el séptimo capítulo, *Conclusiones*, se redacta un breve resumen que sintetiza el análisis que el documento lleva a cabo. Así mismo, se proponen trabajos futuros.

Parte II. Pliego de condiciones

En el primer capítulo, *Condiciones generales*, se establecen las condiciones que el desarrollo de un proyecto de este tipo requiere, que implica conocer la normativa respecto al uso de pantallas de visualización de datos (PVD).

En el segundo capítulo, *Especificaciones técnicas*, se detallan las características del equipamiento empleado, así como las que se requieren del autor y supervisor.

Parte III. Presupuesto

En el primer capítulo, *Presupuesto*, se estiman los costes asociados a la redacción del documento.

Anexo I. Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030

Se analiza el grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030.

Bibliografía

Se incluyen todas las fuentes empleadas en el desarrollo del trabajo y redacción del documento.

Capítulo 2

Concepto de espacio aéreo de la OACI

La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) ofrece una descripción general del espacio aéreo, definiéndolo como *aquella porción de la atmósfera terrestre, sobre tierra o agua, que está regulada por un país en particular*. Además, especifica que *de acuerdo con el tipo de operaciones que alberga, se puede hablar de diferentes clases de espacios aéreos* [49].

La OACI describe el *concepto de espacio aéreo* como un plan en el que se describen las operaciones previstas dentro del espacio aéreo. Es decir, se realiza una distinción entre el *espacio aéreo* (tangible: porción de la atmósfera) y el *concepto de espacio aéreo* (intangible: plan estratégico).

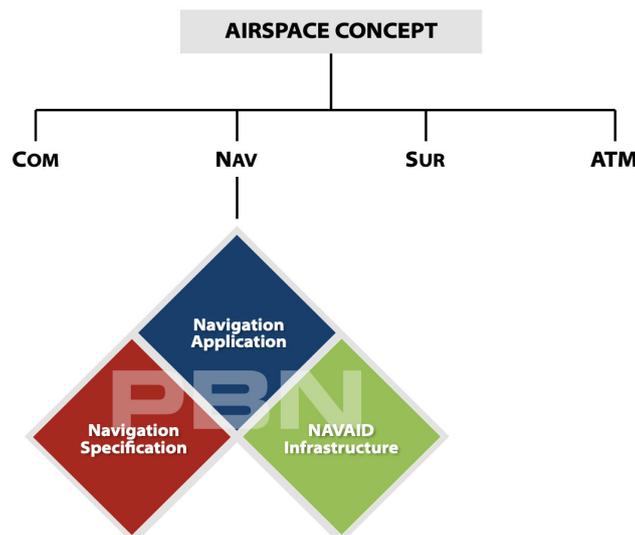


Figura 2.1: Concepto de espacio aéreo de la OACI [1].

En la Figura 2.1 se muestran los diferentes componentes que forman parte del *concepto de espacio aéreo* de la OACI. Se observa que está formado por los sistemas CNS (Comunicación (*Communication* (COM)), Navegación (*Navigation* (NAV)), Vigilancia (*Surveillance* (SUR))) y Gestión de Tráfico Aéreo (*Air Traffic Management* (ATM)). También queda reflejado en esta figura, que la Performance Based Navigation (PBN), de la que después se hablará en profundidad, forma parte del subsistema de *Navegación*. Así mismo, se muestran los tres componentes de la PBN, que también se tratarán en el Capítulo 3.

En el corazón del *concepto de espacio aéreo* yace el diseño del *espacio aéreo*, que tiene por meta satisfacer los objetivos estratégicos. Estos son: la mejora o el mantenimiento de la seguridad, el crecimiento de la capacidad de tráfico dentro del espacio aéreo, la mejora de la eficiencia, la mitigación del impacto ambiental y la proporción de trayectorias más precisas.

Los diferentes conceptos de espacio aéreo también pueden incluir detalles de la estructura de las rutas ATS, los mínimos de separación, el espaciado de la ruta y la separación de obstáculos. Esto hace que se impongan ciertos requisitos a los subsistemas CNS (comunicaciones, navegación y vigilancia ATS) y ATM. Es decir, se sigue un enfoque que primero busca los objetivos y después define los requisitos.

En la actualidad, con el objetivo de seguir mejorando la capacidad, eficiencia, seguridad, precisión e impacto ambiental, se está realizando un viraje hacia las operaciones basadas en trayectorias 4D (*4D Trajectory-Based Operations* (TBO)).

Las 4D TBO son operaciones en las que el tiempo se suma como cuarta dimensión a las convencionales tres dimensiones espaciales de las trayectorias. Es decir, cualquier retraso se convierte en un cambio de trayectoria que representa una distorsión de igual calibre que un cambio de nivel o una desviación lateral. Por tanto, las intervenciones tácticas de los ATCO deben tener en cuenta el retraso que se puede ocasionar [50].

El uso de las trayectorias 4D reportará grandes beneficios como:

- Incremento en la predictibilidad del tráfico.
- Desarrollo de operaciones óptimas para las aerolíneas, que les permitan ofrecer unos mejores servicios.
- Reducción de costes y emisiones.
- Incremento en las capacidades.
- Mayor facilidad y seguridad en el manejo táctico de las aeronaves por parte de los ATCO debido a los menores conflictos.

A continuación se habla de qué equipos se usan y qué avances y planes hay para cada uno de los subsistemas para permitir el desarrollo de las 4D TBO.

2.1. Comunicación

Los canales de comunicación juegan un papel de vital importancia dentro del concepto de espacio aéreo, pues son los que aseguran el intercambio de información entre los controladores

de tráfico aéreo (*Air Traffic Controllers* o ATCO) y entre los ATCO y los pilotos. Por ello se requiere que estos canales de comunicación sean vínculos estables y eficientes [51].

En la actualidad se está evolucionando progresivamente hacia la digitalización del intercambio de datos. Por ello, se trabaja en la implementación paulatina de nuevas tecnologías de enlace de datos, que van a permitir mayor capacidad, fiabilidad, eficiencia y requisitos operativos más estrictos. Estas tecnologías son [52]:

- **Comunicaciones por satélite (*Satellite Communications* (SATCOM))**: sistema capaz de soportar enlaces de datos y comunicaciones por voz. En la actualidad, en comparación a las comunicaciones VHF, su uso aún es escaso.

Se considera que el uso de SATCOM será en el futuro más extendido para ATM, pues es un método que asegura la transmisión fiable de datos con las capacidades requeridas, aun tratándose de transmisión en zonas remotas, continentales u oceánicas. No obstante, cabe mencionar que su funcionamiento se basa en satélites geoestacionarios, por lo que sus capacidades sí se pueden ver reducidas en los polos [53].

- **Sistema de comunicación aeronáutica digital de banda L (*L-band Digital Aeronautical Communication System* (LDACS))**: es un sistema de banda ancha que opera en banda L (alrededor de 1 GHz), la cual presenta excepcionales características de propagación, pero graves problemas de compatibilidad operacional debido a la ya gran variedad de sistemas que operan en esta misma banda (DME, GNSS, telefonía móvil). Se está trabajando ahora en intentar lograr que el sistema termine siendo espectralmente compatible con los sistemas ya en uso en la misma banda [54].

El sistema necesita visión directa con el objetivo (*Line-Of-Sight* (LOS)) para funcionar. Funciona como un enlace de datos, con capacidades adicionales que podrían integrarse en el futuro en el ATM. Se investiga en la actualidad sobre como podría implementarse este sistema de forma que se utilizase para vigilancia y para control y comando de RPAS.

- **Sistema de comunicación aeronáutico móvil para aeropuerto (*Aeronautical Mobile Airport Communication System* (AeroMACS))**: es un sistema estandarizado que opera en la banda C (5 GHz) que permite las comunicaciones a alta velocidad de transmisión de datos y distancia corta.

Esta tecnología es la que la OACI ha seleccionado para ayudar a gestionar los cada vez más saturados aeropuertos, que generan cada vez más volumen de intercambio de datos. Esta solución apoya los usuarios móviles (vehículos de servicio del aeropuerto, dispositivos de mano y aviones) y fijos (sensores, etc.), proporcionando la seguridad y regularidad necesaria.

Se pretende que sea la base de las comunicaciones en la superficie de un aeropuerto para aerolíneas y proveedores de servicios de navegación aérea. No obstante, está aún en fase de implementación, y en Europa solo está implementado en el aeropuerto de Lisboa [55].

Por otra parte, se trabaja en la Infraestructura para Comunicaciones del Futuro (*Future Communications Infrastructure* (FCI)), que es un nuevo sistema que se basa en la red aeronáutica de telecomunicaciones (ATN), en el protocolo IPS y en el SWIM. La FCI define las características de la necesaria interoperabilidad para la gestión de la red de telecomunicaciones y el intercambio de datos. Logra proporcionar suficiente capacidad para realizar una comunicación digital segura que soporte los subsistemas de Comunicación, Navegación y Vigilancia

(CNS). Facilita además la red necesaria que interconecte los sistemas aéreos y terrestres mediante el uso de múltiples subredes de enlace de datos aire/tierra (multilink) de banda ancha. Al mismo tiempo, también habilita redes centrales (NewPENS) que facilitan la transmisión de datos aeronáuticos y permiten las aplicaciones de voz para mejorar la seguridad y regularidad de los vuelos.

NewPENS permite el intercambio de información crítica y común ofreciendo una robusta base sentada sobre una infraestructura basada en protocolos de internet. Esto es gracias a que este sistema puede ofrecer una disponibilidad de hasta el 99,999 %, está blindado con precauciones de ciberseguridad y ofrece un servicio de monitorización y alerta en caso de fallos [56].

2.2. Navegación

La navegación es otro de los subsistemas del concepto de espacio aéreo, pero además, ha sido un concepto clave desde los inicios, pues lo más importante cuando se vuela es saber dónde está la aeronave y cómo se puede llegar al destino de forma segura. En la actualidad, la navegación se sustenta sobre una tecnología sofisticada y sobre una coordinación eficiente entre el piloto y los ATCO [51].

A pesar de todos los avances, ubicar y guiar una aeronave sigue siendo un desafío. Esto es debido a que lo anterior implica saber la posición lateral de la aeronave (comprobar que no se ha desviado de la línea central de la ruta), su posición vertical (la aeronave debe mantenerse a una altitud específica), su posición longitudinal (en que punto de la ruta está) y temporal (implica la condición de llegada a un punto en un tiempo).

Múltiples sistemas son los usados en la actualidad. Estos se nutren de una gran infraestructura. De los sistemas usados, destacan la navegación inercial (INS), la radionavegación y la navegación basada en satélites GNSS. En el Capítulo 3 se habla en profundidad de los antecedentes de la navegación aérea y del que es el sistema de la mayor relevancia, que se está implantando en la actualidad, la Performance Based Navigation (PBN).

2.3. Vigilancia

La vigilancia permite conocer quién está dónde y en qué momento, lo que es clave para la seguridad. Esta se basa en una red de sensores que con diferentes capacidades. Según su tipo, son capaces de detectar aviones, calcular su posición y/u obtener su información para ofrecer todo esto a los ATCO en las pantallas [57].

En la actualidad el espacio aéreo se gestiona haciendo uso de los siguientes sistemas:

- **Radar primario de vigilancia (*Primary Surveillance Radar (PSR)*):** trabajan con todo tipo de aeronaves (aviones, helicópteros, drones...) sean cooperativas o no.

Esta antena radar funciona rotando a unas 5 a 12 rpm, lo que hace que use un sistema de coordenadas polar. El PSR es capaz de medir ángulo y distancia (distancia inclinada, pues mide la distancia en línea recta de la aeronave a la antena, no la distancia en horizontal) de cada una de las aeronaves. Emite un pulso electromagnético que es estrecho, pero cuya

potencia llega a gran altitud y distancia. Si este pulso electromagnético alcanza cualquier objeto volador de suficiente tamaño, es reflejado, de forma que parte de la energía vuelve en el sentido de la antena y esta puede detectar el eco. La distancia es calculada por la diferencia de tiempo entre el pulso emitido y el eco recibido, mientras que el ángulo se calcula sabiendo el ángulo de rotación de la antena. Los grandes inconvenientes de esta antena son que presenta un cono de silencio y que no sabe distinguir entre diferentes aeronaves (no sabe si una señal reflejada lo ha sido por un avión o un helicóptero) [58].

- **Radar secundario de vigilancia (*Secondary Surveillance Radar (SSR)*):** estos radares solo trabajan con las aeronaves cooperativas, es decir, requieren que la aeronave tenga cierto equipamiento (transponder) a bordo. El transponder es un receptor y transmisor que genera una respuesta cuando recibe una interrogación por parte de algún sistema de radar (las frecuencias de las interrogaciones y las respuestas son distintas). El transponder tiene tres modos de funcionamiento: A (solo responde con el código de identificación de la aeronave), C (responde con la identificación y la información del nivel de vuelo o altitud) y S (además de lo anterior, permite el intercambio de datos).

Al igual que con el PSR, esta antena radar también trabaja a base de rotar a unas 5 a 12 rpm. El SSR además de medir ángulo y distancia, es capaz de obtener el código de identificación de la aeronave (si el transponder trabaja en Modo A) y/u otra información dependiendo del modo de funcionamiento del transponder. El cálculo de la distancia y el ángulo se realiza de igual modo, con la diferencia de tiempo de llegada de la recepción y con el azimut de giro de la antena. La diferencia es que ahora sí se puede identificar la aeronave, pero se requiere de la colaboración de esta, es decir, una aeronave sin transponder no puede ser detectada por un SSR [59].

- **Multilateración (MLAT):** el transponder, además de ser activado por el SSR también puede ser activado por un interrogador MLAT. El sistema de multilateración está conformado por una red de sensores, de forma que se puede utilizar la diferencia de tiempo que la señal tarda en llegar a estos para calcular la posición de la aeronave de forma precisa.
- **Sistema de vigilancia automática dependiente de difusión (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)*):** este sistema es mucho más barato y fácil de instalar que los anteriores. Su funcionamiento consiste en la recepción de las señales enviadas por la aeronave, la cual ha calculado previamente su posición con los equipos de a bordo (navegación inercial, usando las constelaciones GNSS...). Es decir, a diferencia de los PSR, SSR o MLAT, este sistema no requiere del cálculo de la posición de la aeronave, ni de mandar señales de interrogación, ya que es la aeronave la que de manera voluntaria emite su información y posición en cortos intervalos regulares.

El ADS-B es concebido como uno de los sistemas clave que va a permitir crear la nueva red de ATM, siendo uno de los pilares fundamentales para lograr los objetivos de seguridad, capacidad, eficiencia y sostenibilidad de los proyectos de cielo único europeo (*Single European Sky (SES)*) y NextGen, de los que se habla en profundidad en la Sección 2.4 [60].

De los sistemas anteriores, el PSR, el SSR y la MLAT son independientes, ya que calculan la posición a través de la respuesta recibida o la señal reflejada, haciendo uso de la diferencia de tiempos entre la señal emitida y la recibida (*Time Difference Of Arrival (TDOA)*). En cambio, el sistema ADS-B es dependiente, pues la posición se calcula a bordo, y requiere de la emisión

de la información por parte de la aeronave. Además, esto implica que los errores de posición dependen de los errores cometidos por el sistema de navegación de a bordo.

Por otra parte, el PSR se clasifica como sistema no cooperativo, pues no requiere de la aeronave para realizar ninguna operación y puede detectarla sin que esta realice acción alguna. Por contra, el SSR, la MLAT y el ADS-B sí requieren de la colaboración de la aeronave (transponder) y, por tanto, se consideran sistemas cooperativos.

En la actualidad se trabaja en la mejora de la interoperabilidad de los cuatro sistemas mencionados anteriormente, en la mejora de los sistemas existentes y en la expansión del ADS-B, que es el sistema más reciente, que también se está lanzando al espacio.

2.4. ATM

La gestión de tráfico aéreo consiste en el uso conjunto de todos los sistemas y funciones aéreas y terrestres, que son requeridos para satisfacer cierta eficiencia y seguridad en el movimiento de las aeronaves durante todas las fases de las operaciones [61].

La ATM esta compuesta por tres servicios diferentes:

- **Gestión del espacio aéreo (*Airspace Management (ASM)*):** tiene el objetivo estratégico de poder gestionar lo más eficientemente posible el espacio aéreo, elaborando para ello planes de mejora y estructurándolo como más convenientemente sea.
- **Gestión de afluencia de tráfico aéreo (*Air Traffic Flow Management (ATFM)*):** su función es pretáctica, es decir, se desempeña con menor antelación a la que se tiene para la ASM, pero no se trata de una actuación que se dé en tiempo real.

Este servicio se encarga de la regulación de la afluencia de aeronaves para evitar la congestión en ciertos sectores. El objetivo es satisfacer al máximo la oferta y demanda del espacio aéreo garantizando la seguridad, es decir, se intenta que los vuelos se repartan a lo largo del día para que no haya sectores saturados durante una franja horaria, y en otra estén vacíos.

Todo esto se realiza principalmente mediante la asignación de slots de salida en aeropuertos, es decir, mediante la asignación de franjas horarias de despegue para cada uno de los aviones. No obstante, por diferentes problemas que pueden surgir, los slots no siempre se cumplen, lo que puede llevar a la necesidad de una intervención por parte de los controladores.

- **Servicio de tráfico aéreo (*Air Traffic Service (ATS)*):** es un servicio que realiza intervenciones tácticas, es decir, en tiempo real. Es un servicio mayormente operado por los ATCO, cuya función principal consiste en evitar colisiones, a través de la aplicación de los estándares de separación, mediante autorizaciones, instrucciones y vectores.

Además de evitar colisiones entre aviones, también deben mantener el orden en el tráfico, proveer a los pilotos de información útil (climatología, pista en uso, ...) y avisos, además de notificar a las autoridades competentes en caso de emergencia o necesidad de rescate [62].

Por tanto, la gestión de tráfico aéreo (ATM) se basa en ofrecer servicios; servicios que se encargan de llevar de manera segura a una aeronave de un punto A a un punto B, haciendo uso óptimo de los recursos, con la separación adecuada y dentro de los límites de capacidad del espacio aéreo.

De acuerdo a la OACI, hay ciertos principios que rigen y de los que depende la ATM. Estos son [63]:

- **Seguridad:** la prioridad máxima del sistema ATM es conseguir resultados eficientes y efectivos en los que en todo momento prime al máximo la seguridad.
- **Humanos:** los seres humanos desempeñamos un papel esencial en el sistema ATM. Somos los responsables del diseño, la implementación y la monitorización del sistema. Nos encargamos de intervenir en caso necesario, para garantizar que el sistema hace su función de manera segura. Además, como antes se comentaba, en todos los servicios que ofrece el ATM, gran parte del peso de estos recae sobre nosotros (bien como ATCO, como ingenieros...).
- **Tecnología:** pese a que para la definición de ATM no se especifica ninguna tecnología específica (más bien, se abordan las funciones que debe tener o cumplir), la tecnología y los avances en esta son vitales para el funcionamiento del ATM. Como se ha visto en secciones anteriores, la tecnología para los subsistemas CNS está avanzando hacia el desarrollo de mejoras en capacidad, eficiencia, seguridad, interoperabilidad...
- **Información:** el intercambio de información es esencial para que se puedan llevar a cabo las operaciones de forma segura y eficiente. La ATM depende en gran medida del suministro de información oportuna, precisa, acreditada y de calidad para poder tomar las decisiones correctas.
- **Colaboración:** va ligada al principio anterior, puesto que se necesita de colaboración para el intercambio de información.
- **Continuidad:** es también de gran importancia que el sistema ATM sea capaz de realizar su función y ofrecer su servicio sin ninguna interrupción no programada, puesto que esta podría llevar a amenazas de la seguridad.

La OACI concibe ya en 2005 un concepto operacional para ATM que va en la línea de armonizar e integrar toda la gestión de tráfico aéreo (ATM) a nivel mundial. La intención que tiene la OACI es lograr una gestión de tráfico aéreo con interoperabilidad que sea para todo usuario y durante todas las fases del vuelo, además de ser una gestión económica, eficiente, sostenible y lo que es más importante, segura.

Esta necesidad de renovación del concepto operacional de la ATM se ve acentuada por el crecimiento constante e incesante del tráfico aéreo.

La pandemia mundial de la COVID-19 ha dejado tras suyo una estela de desaceleración económica, crisis, inflación y precariedad en muchos sectores. El sector de la aviación fue, junto con los muchos del sector servicios, de los más afectados. A pesar de que la aviación no es solo comercial, sí que es esta la que representa el mayor porcentaje de vuelos realizados. En la Figura 2.2 se ve como en 2017 (tres años antes al inicio de la pandemia en marzo de 2020) los vuelos de pasajeros y los de negocios suman en total un 93 % de la cuota de mercado.



Figura 2.2: Cuota de mercado de los diferentes sectores de la aviación [2].

Según los datos de un comunicado de la IATA [64], en 2020 volaron un total de 1.800 millones de pasajeros, lo que representa un descenso del 60,2% respecto a los 4.500 millones que lo hicieron en 2019. Este porcentaje de descenso, en Europa, llegó a ser de hasta el 67,4%.

No obstante, a día de hoy, una vez publicados los datos de 2022, se observa que el tráfico ha crecido este último año un 41,3% y se ha situado así en el 75,3% respecto a los niveles de noviembre de 2019. El tráfico que más ha crecido es el internacional, aumentando hasta un 85,2% [65].

Las perspectivas de futuro indican que, para 2040, puede haberse llegado a casi duplicar el número de pasajeros (véase Figura 2.3), con el consiguiente aumento de la demanda del espacio aéreo

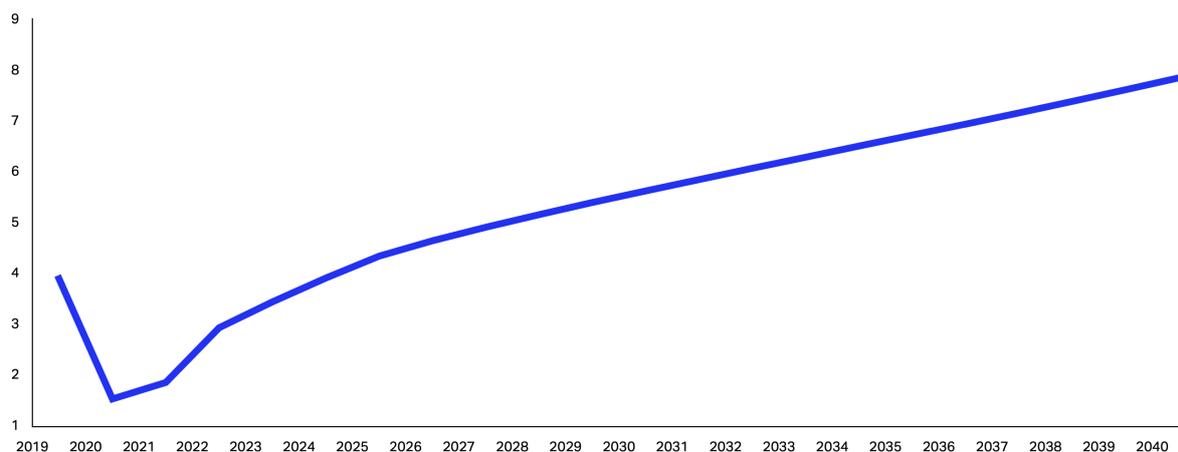


Figura 2.3: Pasado y pronóstico de aumento de pasajeros en billones de pasajeros [3].

Además del previsto crecimiento y de la voluntad de mejora de la eficiencia, seguridad, capacidad, precisión y sostenibilidad; hay un último factor que también es relevante en esta evolución de la ATM: es la aparición de nuevos actores en el espacio aéreo, los drones. El auge de este sector está creando nuevos mercados y oportunidades de negocio, por lo que es necesario legislar y adaptar los sistemas y tecnologías actuales para dar cabida a estas nuevas aeronaves.

Por todo ello, las principales potencias económicas y aeronáuticas, Europa y EEUU (con una cuota de mercado aeronáutico del 31 % y 29,3 % respectivamente, seguidas de Asia/Pacífico con el 21,7% [3]), materializan esta necesidad de renovación de la ATM en el proyecto *Single European Sky ATM Research* (SESAR) en Europa y en el proyecto NextGen en EEUU, de los que se habla a continuación.

2.4.1. SESAR

En el caso de Europa, el pronóstico mostrado en la Figura 2.4 indica que en el mejor de los casos, para 2050 se tendrá un nivel de vuelos que será un 76 % mayor que en 2019. Este crecimiento se suma al hecho de que los pasajeros demandan vuelos más permisivos, eficientes, seguros y respetuosos con el medio ambiente. Todo esto no puede abordarse haciendo uso de una tecnología que, según la Comisión Europea, es a todas luces, si bien no obsoleta, sí desfasada. Esta concepción se fundamenta en el hecho de que esta tecnología requiere que los aviones tengan que seguir rutas predefinidas y no rutas que puedan minimizar el consumo y/o contaminación acústica. En definitiva, con esta tecnología no se consigue una gestión óptima del tráfico aéreo.

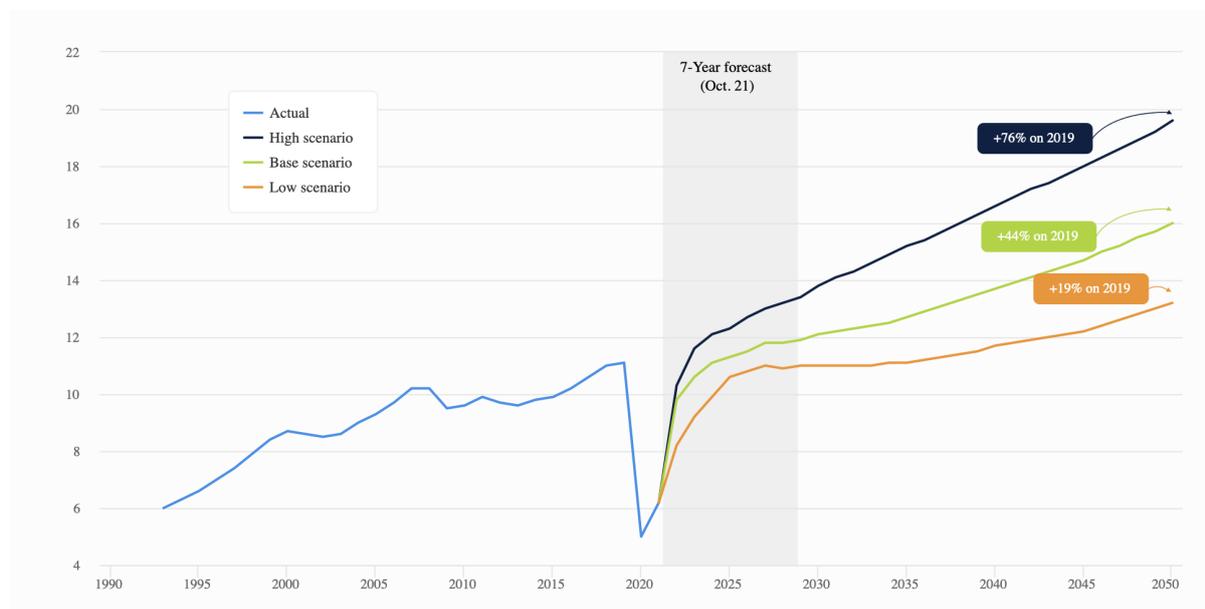


Figura 2.4: Pasado y pronóstico de aumento de vuelos en Europa en millones de vuelos [4].

El no conseguir una gestión óptima implica retrasos cada vez más largos, que pueden deberse, como se ve en la Figura 2.5 a diferentes causas. De todas ellas, en la Figura 2.5 se observa que la Capacidad o el Personal son las causas que mayor retraso causan con diferencia. Las interrupciones del control de tráfico aéreo, que pretenden ser mitigadas, también son, en la actualidad, autoras de un porcentaje significativo de las interrupciones. Es decir, se pretende

mejorar las esperas, disminuyendo todos los retrasos que no tengan que ver con las condiciones meteorológicas.

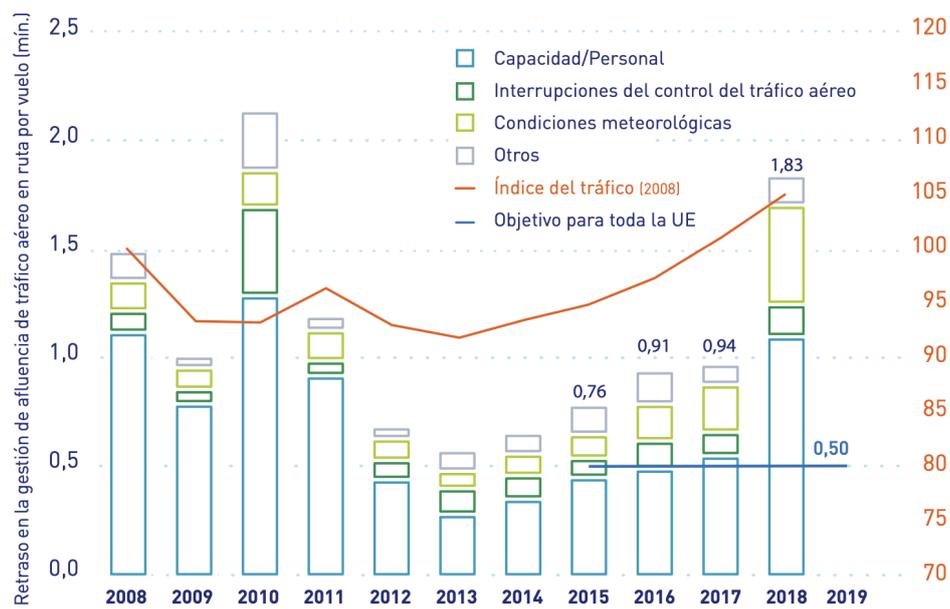


Figura 2.5: Retraso medio en la gestión de afluencia de tráfico aéreo por vuelo [5].

Por tanto, es necesario actuar, y por ello, la Comisión Europea consideró la necesidad de un plan de mejora y modernización si se pretendía mantener los mismos estándares de seguridad. Nace SESAR, que es el proyecto de modernización del espacio aéreo europeo.

SESAR nació en 2005 junto con el concepto operacional de la ATM de la OACI. Su implementación se está llevando a cabo en tres fases [66]:

- **Fase de definición:** se da desde 2005 a 2008, siendo el plan maestro de la gestión del tráfico aéreo europeo, del que después se habla en profundidad, el principal hito de esta fase de definición. Esta fase cuenta con un presupuesto de 60 millones de euros.
- **Fase de desarrollo:** se da de 2008 a 2024 y es la fase en la que se desarrollan todas las tecnologías y sistemas que van a estar encargadas de hacer posible la implementación del cielo único europeo. Se realiza en dos fases 2008-2016 y 2016-2024, con un presupuesto total de 3,7 billones de euros.
- **Fase de despliegue:** se da a partir de 2015 y se espera que dure hasta, por lo menos, 2035. Es la fase en la que se realiza la instalación de todos los sistemas y se implementan las nuevas funciones. Se espera que tenga un coste de entre 18 y 28 billones de euros.

El que fue el plan inicial de gestión del tráfico aéreo europeo ha ido sufriendo y seguirá sufriendo iteraciones a medida que las tecnologías vayan desarrollándose e implementándose. Su última versión actualmente es la de 2020. En este documento se explica que la segunda fase del desarrollo y el despliegue se está poniendo en marcha en cuatro fases progresivas, pero que se superponen. Tomando este enfoque gradual se consigue que la infraestructura evolucione

haciendo iteraciones que vayan adaptándose a la rápida digitalización que está experimentando la aviación. Las cuatro fases son [5]:

- **Fase A:** en esta primera fase se abordan las deficiencias críticas ya conocidas del rendimiento de la red. Se implementan soluciones que permiten la colaboración de las partes interesadas. Se trabaja además en la gestión de la información para que esta pueda abarcar todo el sistema. También se introducen medidas para poder lograr un equilibrio entre la capacidad de la red y la demanda.
- **Fase B:** se presentan los servicios y procedimientos iniciales de U-space. Todos estos servicios y procedimientos requieren un alto nivel de digitalización y automatización de funciones, por lo que necesitan de su integración conjunta con el proyecto SESAR, que garantiza una nueva y renovada gestión del tráfico aéreo (ATM).

El objetivo de U-space es proporcionar un acceso seguro, eficiente, regulado y coordinado de los UAS al espacio aéreo europeo, así como garantizar su convivencia segura con aeronaves tripuladas en determinados espacios aéreos. Se toma en cuenta que el despliegue de U-space traerá consigo tres nuevos actores: operadores o pilotos de drones, proveedores de servicios U-space y proveedores de servicios de información común.

Además, en esta fase se presentan los primeros servicios de datos de ATM, con lo que se logra empezar a ofrecer servicios e infraestructuras eficientes. Se introducen también operaciones transfronterizas por medio de rutas libres y se integra la gestión avanzada del rendimiento de los aeropuertos en la red.

- **Fase C:** la virtualización y la introducción gradual de niveles más elevados de automatización permitirán en esta fase reorganizar los cielos europeos con una configuración dinámica, que también se verá respaldada por la integración de los aeropuertos en la gestión del tráfico aéreo. La gestión de operaciones rutinarias con drones hará el espacio aéreo, si cabe, más dinámico.
- **Fase D:** el resultado es un cielo digital europeo, concebido como un sistema totalmente escalable para la aviación tripulada y no tripulada, con el respaldo de un ecosistema digital y altos niveles de automatización y conectividad.

El desarrollo actual está en el punto de casi haber finalizado la fase A, a la vez que ya se ha iniciado la fase B. Esto implica que se han implantado un tercio de las soluciones SESAR y otro tercio está en desarrollo. Estos dos tercios serán los necesarios para la implantación de la fase C. El último tercio corresponderá a la investigación y el desarrollo futuro para la puesta en marcha de la fase D.

La culminación del plan llevará a la materialización de un cielo digital europeo, cuyo potencial será de tal valor que beneficiará tanto a la economía como a la sociedad europea.

2.4.2. NextGen

En los Estados Unidos, su espacio aéreo, nombrado *National Airpace System* (NAS) empezó a congestionarse hacia finales de los años 90, causando retrasos en el 25% de los vuelos. Al igual que en Europa, también se esperaba entonces y se sigue esperando en la actualidad un

gran crecimiento de la aviación comercial. Fue en el verano del año 2000 cuando se produjo una gran congestión que causó grandes retrasos y que ya hizo que los dirigentes concibiesen la necesidad de una renovación del National Airspace System (NAS). Después del 11S, además de endurecerse las medidas de seguridad que regulaban el transporte aéreo de pasajeros y mercancías, fue cuando se creó finalmente la llamada *Joint Planning and Development Office* (JPDO), que sería la encargada de desarrollar y coordinar los planes de transporte aéreo.

La JPDO fue la encargada de orquestar el nacimiento del Plan Integrado del Sistema de Transporte Aéreo de Próxima Generación (*Next Generation Air Transportation System Integrated Plan*), actualmente conocido simplemente como NextGen.

Debido a que NextGen es, al igual que SESAR, un proyecto de muy gran escala con una duración prevista de dos décadas (hasta 2025), la *Federal Aviation Administration* (FAA), que es el organismo encargado del espacio aéreo estadounidense, decide segmentar el proyecto en cuatro periodos de cinco años. A pesar de esta segmentación, la propia FAA es consciente que para 2025 no estarán integrados todos los sistemas necesarios.

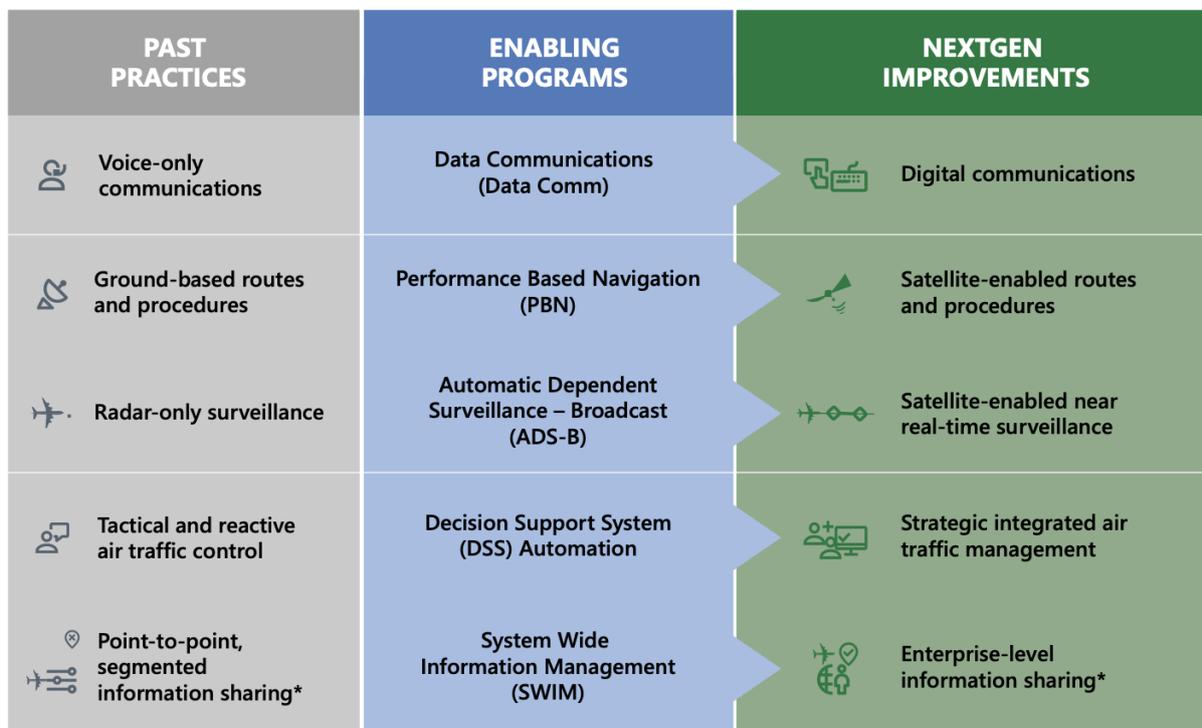


Figura 2.6: Tecnología que permite la evolución hacia nuevos procedimientos con el programa NextGen [6].

En la Figura 2.6 se muestra en qué tecnologías de Comunicación, Navegación y Vigilancia está trabajando la FAA para poder mejorar el espacio aéreo estadounidense. Estas tecnologías, a excepción del *Decision Support System* son las que han sido mencionadas anteriormente en las secciones 2.1 Comunicación, 2.2 Navegación y 2.3 Vigilancia.

Las comunicaciones de datos se realizan a través de la tecnología *Controller Pilot Data Link Communications* (CPDLC). Estas constituyen una forma rápida de comunicación, pues no requieren del tiempo que necesitan las comunicaciones por voz. Tras culminarse la implantación de esta tecnología CPDLC en un total de 62 aeropuertos en agosto de 2018, los ATCO han

podido dar varias autorizaciones en el tiempo que tardarían en dar una sola autorización por voz.

Desde 2015, los procedimientos y rutas basadas en PBN son el estándar en EEUU, con más de 9600 rutas y procedimientos, que incluyen salidas, llegadas y aproximaciones a más de 500 aeropuertos. Por tanto, las rutas convencionales basadas en el uso de VOR/DME, así como los procedimientos, están siendo reemplazados, dando un giro hacia los procedimientos y rutas basados en navegación satelital.

El ADS-B fue oficialmente un sistema requerido a bordo de las aeronaves en enero de 2020, lo que ha permitido que ahora se tenga cobertura en zonas donde antes los radares no tenían. Esto ha sido posible gracias a la sencilla y económica instalación de este sistema.

El sistema DSS se utiliza para la gestión de afluencia de tráfico aéreo (ATFM). Mediante la mejora de la conciencia situacional común a través del intercambio de información, este ayuda a maximizar la eficiencia y equilibrio entre demanda y capacidad, reduciendo así los retrasos en cada fase de los vuelos. El DSS se divide en tres subsistemas: *Traffic Flow Management System* (TFMS), *Time Based Flow Management* (TBFM), ya implementado en 20 centros de control de ruta, y *Terminal Flight Data Manager* (TFDM), cuya implementación inició en 2017 y se espera finalizada en 2028 [6].

El sistema SWIM es usado para el intercambio de información no sensible. Funciona como una especie de punto de acceso común que evita que la información deba ser transmitida punto a punto. Esto hace que todos puedan ver la misma información al mismo tiempo, se desaturen las comunicaciones y, por tanto, se reduzcan las esperas.

NextGen es flexible ante la incorporación de los drones al espacio aéreo. La FAA ya trabaja en la incorporación segura de estas nuevas aeronaves al *National Airspace System* (National Airspace System (NAS)). Por ello nace el *UAS Traffic Management* (UTM), un ecosistema para operaciones que el control de tráfico aéreo convencional no atiende.

2.4.3. Armonización de los programas SESAR y NextGen

SESAR y NextGen son los dos más grandes planes de modernización de la gestión del espacio aéreo a nivel mundial, que, como se ha comentado, están siendo desarrollados por la Unión Europea y los Estados Unidos respectivamente.

Dada la necesidad de interoperabilidad y armonización de requisitos a corto, medio y largo plazo, ambas potencias trabajan juntas en el desarrollo de estrategias para comunicación, navegación y vigilancia. También desarrollan conjuntamente un plan para la integración de los UAS en el sistema aeronáutico [67].

Capítulo 3

Performance Based Navigation (PBN)

De todos los componentes que conforman el espacio aéreo, que son la Comunicación, Navegación, Vigilancia y gestión del tráfico aéreo (ATM), este capítulo se centra en el análisis de la navegación, sus antecedentes, su evolución, su estado actual y los planes de futuro.

En el capítulo se hace especial hincapié en la nueva forma de navegación que se está implantando: la navegación basada en requerimientos o *Performance Based Navigation* (PBN). La PBN es uno de los elementos clave que van a permitir la evolución hacia la nueva gestión del espacio aéreo, impulsada por los programas SESAR y NextGen.

Se explica en este capítulo también los elementos que componen la PBN y cuáles son los requerimientos que este tipo de navegación exige a los sistemas en cuanto a precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

3.1. Antecedentes

En los inicios, la navegación aérea era muy básica y se regía por lo que se conocía en la jerga aeronáutica como IFR (I Follow Roads). En este caso, IFR no se refería a que se volaba con reglas de vuelo instrumental, sino que se volaba de forma visual, siguiendo caminos, carreteras, ríos, vías de tren y todo lo que sirviese de referencia, es decir, lo que actualmente se conoce como Visual Flight Rules (VFR).

Más tarde, en los años 10 y 20, aparecieron las primeras señalizaciones, que consistieron en la iluminación de los límites de los aeropuertos, balizas iluminadas giratorias en las torres, etc.

Sobre finales de los años 20 apareció la radio, que fue toda una revolución, pues a través de esta se lograba una comunicación bidireccional, que permitía por primera vez dar actualizaciones sobre las condiciones meteorológicas, pedir ayuda y escuchar señales de navegación.

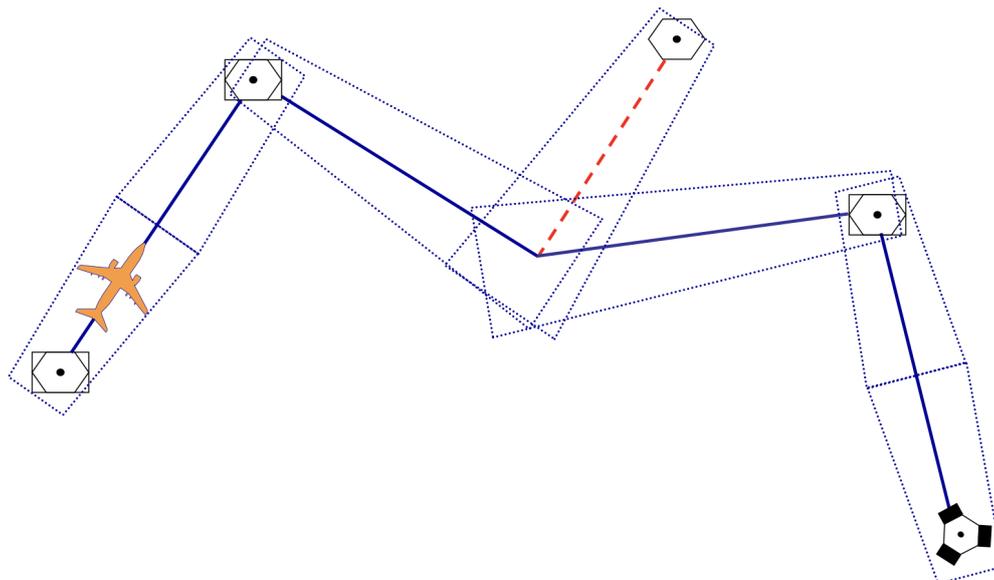


Figura 3.1: Navegación convencional [7].

Posteriormente, en los años 30 y 40, nace el VHF Omni-Directional Radio Range (VOR), que permite, por primera vez, la navegación por instrumentos. El VOR fue mejorando con el tiempo hasta convertirse en una de las primeras ayudas a la navegación (NAVAID), ayudando a definir rutas y jugando un papel importante para los procedimientos de aproximación.

En 1946, la OACI selecciona el ILS como método principal para el aterrizaje en los principales aeropuertos internacionales. Hoy en día el ILS es mundialmente conocido, pues es el sistema más usado para los aterrizajes de los aviones comerciales. Este sistema ha evolucionado hasta el punto en el que existe una clasificación en función de la precisión que el ILS instalado en un aeropuerto determinado es capaz de ofrecer. Se clasifica en CAT I, CAT II y CAT III, subdividiéndose la última en a, b y c. Los sistemas ILS CAT IIIc son los más precisos y permiten que el avión aterrice sin ningún tipo de visibilidad.

A partir de los años 50, se empiezan a usar los Distance Measuring Equipment (DME), que en la actualidad suelen instalarse bien solos, o bien acompañados de un VOR. Los DME también constituyen en la actualidad un tipo de NAVAID.

3.1.1. Desafíos y limitaciones de los sistemas de navegación anteriores

Durante la primera etapa de radionavegación, se empleó lo que actualmente es conocido como Navegación Convencional. Consistía en el sobrevuelo de los NAVAIDs, que estaban instalados sobre el terreno. También podían sobrevolarse las intersecciones generadas por las señales de los mismos, tal y como se ve en la Figura 3.1.

Este tipo de navegación llevaba a una escasa flexibilidad en el diseño de aerovías. Además, la limitada precisión en la estimación de posición hacía que las rutas convencionales requiriesen de amplias áreas de protección y gran separación. Es decir, el rendimiento de los equipos disponibles constituía un condicionante para los criterios de espacio aéreo y de separación de obstáculos, haciendo que los requisitos se basaran en las capacidades disponibles.

El imparable crecimiento de la aviación comercial hizo que aumentase la demanda de capacidad del espacio aéreo, lo que requirió del uso óptimo de este, para aliviar la saturación.

Para dar solución a esto, en los 70 nace en Estados Unidos la Navegación de Área (RNAV). La RNAV es un método de navegación que permite la operación de una aeronave en cualquier trayectoria de vuelo deseada dentro de la cobertura de los NAVAIDS (ayudas de navegación) o dentro de los límites de la capacidad de ayudas autónomas, o una combinación de estos (véase Figura 3.2). Este avance viene de la mano de la primera generación de aviónica digital, que ya permitía un control básico en crucero.

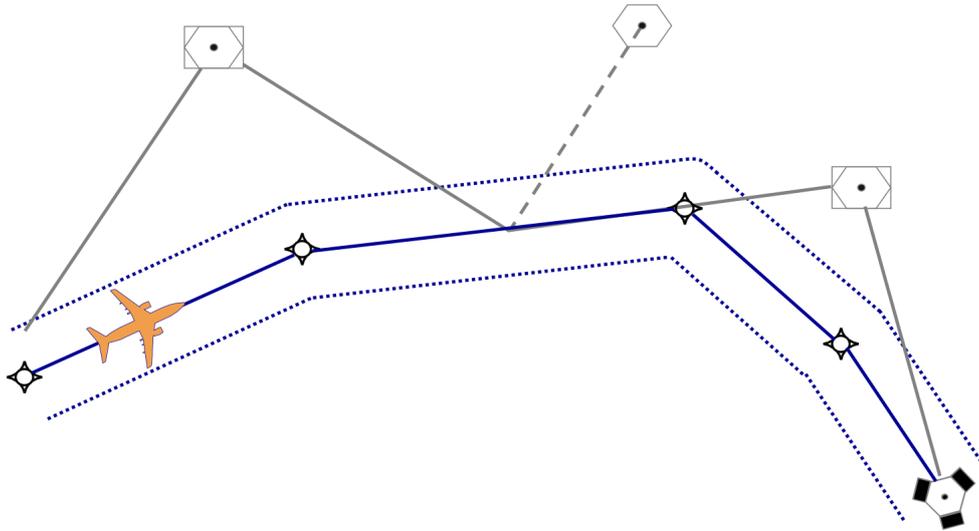


Figura 3.2: Navegación de Área (RNAV) [7].

Si se comparan las Figuras 3.1 y 3.2 se puede ver con claridad que la implementación de la RNAV supuso un claro avance que liberó a las aeronaves de tener que ceñirse a sobrevolar solo ciertas rutas que sobrevolaban los NAVAIDS o sus intersecciones. Se lograba así un gran paso hacia la descongestión del tráfico aéreo.

3.1.2. Transición hacia la PBN

Hasta este momento, el método para indicar la capacidad de navegación requerida se basaba en la prescripción del transporte obligatorio de ciertos equipos. Es decir, los requisitos se referían al nivel de equipamiento a bordo. Para dar solución a esto y como primer paso, el Comité Especial de Futuros Sistemas de Navegación Aérea (FANS) de la OACI desarrolló el concepto de capacidad de rendimiento de navegación requerida (RNCP). El RNCP era un parámetro que describía las desviaciones laterales de la ruta designada.

El concepto de RNCP fue aprobado por el Consejo de la OACI y se procedió a su elaboración en mayor profundidad. Durante este proceso, tras la comprobación de que la planificación del espacio aéreo depende del rendimiento medido y viéndose que capacidad y rendimiento no eran lo mismo, se cambió el concepto de RNCP por el de Required Navigation Performance (RNP) [10].

Tras varias iteraciones del desarrollo, el concepto RNP se amplió para que pasase a ser una especificación del rendimiento de navegación necesario dentro de un espacio aéreo dado. Se comprobó que el guiado asociado a esta especificación no resultaba suficiente para la navegación de área (RNAV) continental (sobre tierra). Esto hizo que se creasen diferentes especificaciones RNAV y RNP para la navegación.

En junio de 2003, la Comisión de Navegación Aérea de la OACI mandó revisar el concepto de RNP considerando las primeras experiencias de aplicación y valorando la tendencia de la industria. La funcionalidad y las aplicaciones de los sistemas RNP y RNAV llevó al desarrollo del concepto de Performance Based Navigation (PBN), que nació con el objetivo de armonizar a nivel global las implementaciones existentes y crear una base para la armonización de las operaciones futuras.

Las especificaciones RNAV y RNP no prescriben los equipos necesarios a bordo, sino el rendimiento que estos debían tener, por tanto, de igual modo, con la PBN los requisitos generales de navegación no quedan condicionados por el rendimiento de ningún sistema. Los requisitos se definen basándose en las necesidades operacionales, quedando reflejados en las especificaciones de navegación, las cuales también indican qué sensores de navegación y qué equipos se pueden utilizar para cumplir con estos requerimientos. Dado que el objetivo es poder lograr una armonía global, todo queda definido de forma muy detallada, para que cada país o estado pueda evaluar las opciones para dar una solución que se acople a las exigencias.

Toda esta transición de navegación basada en sensores a navegación basada en rendimiento, hace que se obtengan diversos beneficios:

- Se reduce la necesidad de mantener rutas y procedimientos que usan sensores específicos, y, por tanto, reduce sus costes asociados.
- Se evita la necesidad de desarrollar operaciones específicas con cada evolución de los sistemas de navegación. Anteriormente, con el uso de navegación basada en sensores, se requería actualizar las operaciones cada vez que estos sensores se renovaban.
- Se permite el uso más eficiente del espacio aéreo, reduciendo así el ruido, los costes en combustible, etc.
- Se facilita el proceso de aprobación de operaciones, pues proporciona un conjunto limitado de especificaciones de navegación destinadas a un uso global.
- Clarifica la forma en la que las especificaciones de RNAV y RNP se usan.

3.2. Requisitos de la PBN

De acuerdo con el *Doc 9613 AN/937 - Performance-based Navigation (PBN) Manual* de la OACI, gracias a la PBN se da el salto a una definición más extensa de la navegación de área, en la que *los requisitos de rendimiento de los sistemas RNAV o RNP del avión se definen en términos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad así como en funcionalidades requeridas para las operaciones propuestas en el contexto de un concepto particular de espacio aéreo, cuando estén respaldados por la infraestructura NAVAID adecuada* [10].

La PBN sistematiza la organización del espacio aéreo y consigue que la separación de aeronave a aeronave se incorpore al diseño de este, lo que permite la migración de ATC a ATM. Es decir, se reduce la probabilidad de que el ATC deba realizar una intervención táctica a través de la eliminación de conflictos estratégicos de las rutas ATS.

Como se ha mencionado, los requerimientos de la PBN se refieren a los términos *precisión*, *integridad*, *continuidad* y *disponibilidad*, que pasan a explicarse en profundidad a continuación.

3.2.1. Precisión

La precisión de una determinada medida o estimación de la posición de una aeronave es el grado de conformidad con el valor real de dicha posición, velocidad y/o tiempo de la aeronave. Es decir, se trata de la diferencia entre la posición estimada o medida y la real [68].

Dado que la precisión es un parámetro estadístico, se hace necesario definir también la medida de la incertidumbre en la posición que se calcula. Esta incertidumbre se puede definir en términos de error, pues se ha comprobado que los errores de navegación suelen seguir una distribución conocida. La incertidumbre se define, pues como la probabilidad de que el error no exceda una cantidad determinada, conocida como el valor de precisión. La precisión se puede expresar como:

- **Percentil x ($x\%$):** indica que el $x\%$ de las posiciones estimadas o medidas tienen un error menor o igual al valor de precisión. Los valores típicos del percentil son 50 %, 67 %, 75 % y 95 %. El percentil 50 % también se conoce como CEP (Circular Error Probable).

La precisión se indicará de forma que se establezca el error y el percentil. Es decir, una precisión de 10 m (95 %) indica que en el 95 % de los casos el error cometido en el cálculo de la posición es menor a 10 m.

- **Valor Cuadrático Medio (rms (*Root Mean Square error*)):** esta medida asume que el error sigue en una distribución normal (no es del todo cierto). Se corresponde con el percentil 68 % para errores unidimensionales y con el percentil 63 % para errores bidimensionales.
- **x sigma ($x \sigma$):** 1 sigma corresponde a una desviación estándar, es decir, a un percentil 68 % para distribuciones unidimensionales y a un 39 % para distribuciones bidimensionales. Por tanto $x \sigma$ corresponde a $x \cdot 68\%$ o $x \cdot 39\%$, según la distribución considerada.

3.2.2. Integridad

La integridad es la medida de la confianza que se puede depositar en la exactitud de la información proporcionada por un sistema de navegación. Para que un sistema esté dotado de integridad, este debe ser capaz de proporcionar advertencias a tiempo cuando hay errores, de modo que los usuarios sean conscientes de cuando el sistema no debe usarse para la navegación [8].

El nivel de exigencia de la integridad es mucho mayor que el de la precisión. Los requisitos de precisión para aviación civil indican que el error debe estar acotado por un percentil del 95 %.

En cambio, los requisitos de integridad se refieren a percentiles que oscilan entre el 99 % y el 99,9999 %. Esto se debe a que de la integridad de un sistema depende la seguridad del mismo.

La integridad es lograda por medio de los conceptos *Límite de alerta*, *Tiempo de alerta*, *Riesgo de integridad* y *Nivel de Protección*.

- **Límite de alerta:** es el error de tolerancia que no debe excederse sin emitir una alarma. En la práctica, el límite de alerta horizontal (HAL, del inglés *Horizontal Alert Limit*) o el límite de alerta vertical (VAL, del inglés *Vertical Alert Limit*) es el máximo error horizontal o vertical en la posición. Si es sobrepasado, el sistema debe declararse NO DISPONIBLE.
- **Tiempo de alerta:** es el máximo tiempo que debería transcurrir entre un evento de integridad y la emisión de una alarma en el sistema que indique lo que ha ocurrido. Se conoce como TTA, del inglés *Time To Alert*.
- **Riesgo de integridad (IR, del inglés *Integrity Risk*):** es el riesgo (expresado en tanto por cien %) de que el error de posición vertical u horizontal exceda el VAL o HAL respectivamente. Este concepto no incluye en su definición el TTA, con el que se relaciona posteriormente a través del concepto *fallo de integridad*.
- **Nivel de protección (PL, del inglés *Protection Level*):** se hace una distinción entre nivel de protección horizontal (HPL) y vertical (VPL). La OACI define este concepto como sigue [42]: *El nivel de protección horizontal proporciona un límite en el error de posición horizontal con una probabilidad derivada del requisito de integridad. Del mismo modo, el nivel de protección vertical proporciona un límite en la posición vertical.*

En la Figura 3.3 se puede observar que, en términos prácticos, el HPL no es otra cosa que el radio de un círculo cuyo centro se encuentra en la posición real de la aeronave. Este círculo conforma una región horizontal en la que se asegura que se encuentra la posición horizontal indicada.

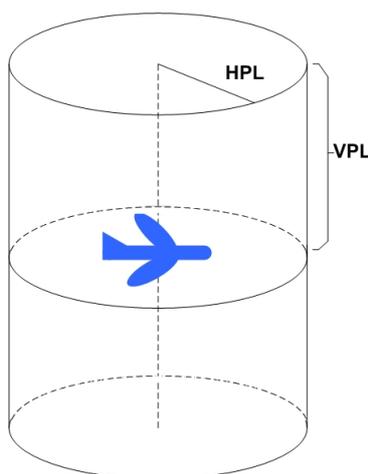


Figura 3.3: Nivel de Protección Vertical y Horizontal [8].

En la misma Figura 3.3 también se observa que el VPL es la mitad de la altura de un cilindro, que tiene como base un círculo de radio igual a HPL, de forma que la posición real de la aeronave queda en el centro de este. Del mismo modo que antes, se asegura que dentro de este cilindro se encuentra la posición vertical indicada.

Otra forma de definir estos niveles de protección es considerarlos como una barrera estadística del error de posición, que se calcula de forma que se pueda garantizar que la probabilidad de que el error de posición vulnere estas barreras esté por debajo del nivel del IR.

El concepto de *fallo de integridad* mencionado anteriormente se trata de un evento de integridad que perdura por más tiempo que el TTA y el cual no causa que se emita ninguna alarma durante el TTA.

La integridad se puede medir a través del *índice de seguridad* (SI), definido como el cociente PE/PL , de modo que si es menor a 1, indicará que no ha habido eventos de integridad, pues el error de posición no habrá sobrepasado el nivel de protección. La integridad también se puede representar de forma gráfica a través de un *diagrama de Stanford*, como el de la Figura 3.4, en donde aparecen representados gran parte de los conceptos anteriores.

El *índice de seguridad* se define como la proporción entre el error del sistema de navegación y el nivel de protección. Por consiguiente, es fundamental que este cociente sea siempre inferior a 1 con el fin de garantizar una operación segura.

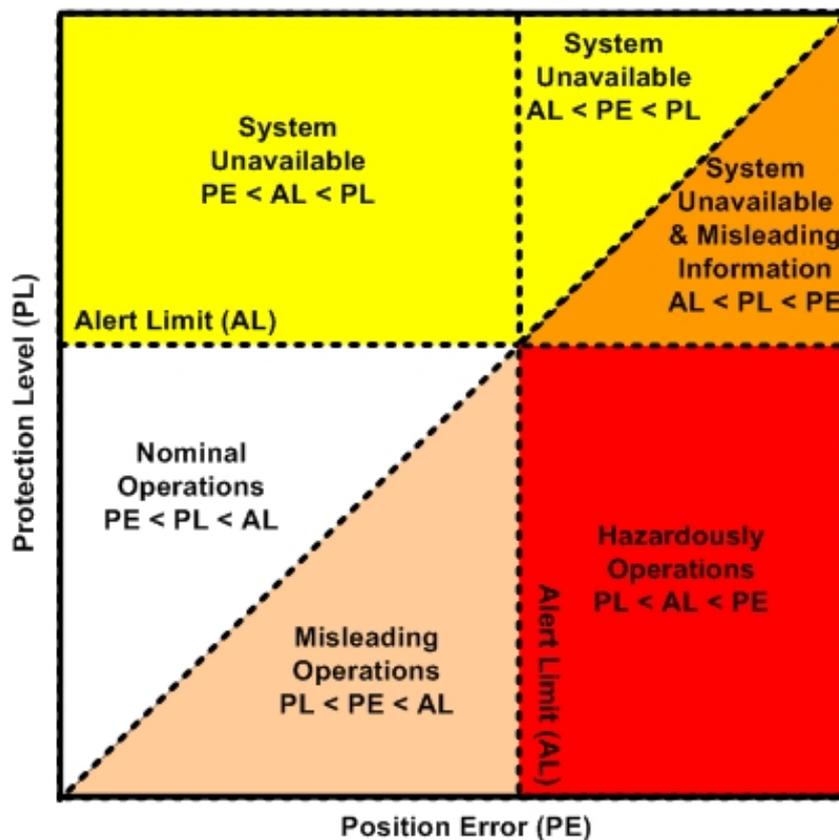


Figura 3.4: Diagrama de Stanford para integridad [8].

En el diagrama de la Figura 3.4 se representa el error de posición PE en el eje x y el nivel de protección PL en el eje y . De esta forma, la línea discontinua que cruza el diagrama en diagonal es la que separa los puntos para los que el nivel de protección es mayor al error de posición (triángulo superior) de los puntos en los que el error de posición supera el nivel de protección

(triángulo inferior). En esta zona inferior se cumple, pues, que $PE > PL$ y cuando se cumpla esto, el sistema se encontrará fuera de tolerancia.

Sobre la diagonal del diagrama se cumple que $PE = PL$. Además, sobre el diagrama también aparece representada como una línea discontinua vertical y horizontal el límite de alerta (AL).

El diagrama queda separado en seis diferentes áreas, que son seis diferentes casos que pueden darse según los diferentes parámetros de integridad (PE, PL y AL). De estos seis casos, dos son eventos de integridad:

- **Información engañosa (del inglés *Misleading Information* (MI)):** es un evento que ocurre cuando, estando el sistema declarado como DISPONIBLE, el error de posición (PE) excede el nivel de protección (PL), sin sobrepasar el límite de alerta (AL).

En el diagrama, este evento ocurriría cuando un punto se sitúa en el triángulo de *Misleading Operations*, en el que se cumple $PL < PE < AL$.

- **Información peligrosamente engañosa (del inglés *Hazardously Misleading Information* (HMI)):** es un evento que ocurre cuando, estando el sistema declarado como DISPONIBLE, el error de posición (PE) excede el nivel de protección (PL) y el límite de alerta (AL).

En el diagrama, este evento ocurriría cuando un punto se sitúa en el rectángulo de *Hazardously Operations*, en el que se cumple $PL < AL < PE$.

Además, el diagrama también es útil para detectar aquellos puntos en los que el sistema no cumple con los requisitos de disponibilidad. Estos puntos son los que se encuentran por encima de la línea horizontal del Alert Limit (AL) y pueden encontrarse en tres diferentes regiones, en las que se dan dos casos:

- **El nivel de protección es superior al límite de alerta:**

$$PE < AL < PL \text{ o } AL < PE < PL$$

En este caso el sistema se encontrará NO DISPONIBLE

- **El nivel de protección y el error de posición son superiores al límite de alerta:**

$$AL < PL < PE$$

En este caso el sistema se encontrará NO DISPONIBLE y además estará proporcionando información engañosa.

El último caso por tratar es el que se da cuando el sistema se encuentra en la zona de operación nominal, en la que se cumple:

$$PE < PL < AL$$

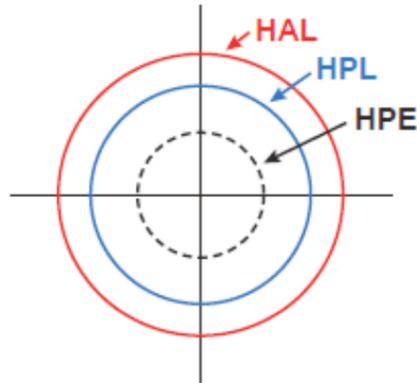


Figura 3.5: Gráfica sobre el plano horizontal del caso en el que el sistema se encuentra operando en la zona nominal [9].

Solo en este modo el sistema estará DISPONIBLE y se cumplirá que toda la información es fiable. Sobre el plano horizontal se vería como en la Figura 3.5.

En la Figura 3.5 se cumple que la aeronave estará dentro de la circunferencia negra discontinua (HPE) y protegida por la circunferencia azul (HPL) y en caso de que se vulnere el nivel de protección, en cuanto se traspase el círculo rojo (HAL) se emitirá una alarma.

3.2.3. Continuidad

La continuidad es la capacidad de un sistema para realizar su función sin interrupciones no programadas. De otro modo, la continuidad es un término que se refiere a la probabilidad (medida en tanto por cien %) de que el sistema mantenga un rendimiento específico durante toda la duración de una fase de una operación, asumiendo que el sistema estuvo disponible al comienzo de dicha fase.

La continuidad se mide para navegación como el tanto por cien de tiempo en el que el sistema mantiene la capacidad operativa sobre un periodo de bien 15 segundos (%/15s) o una hora (%/1h).

Los tipos de fallos que pueden afectar a la continuidad de los sistemas de navegación basados en GNSS son [69]:

- **Fallos graves (*Hard Failures*):** se trata de un tipo de fallo que pueden sufrir los satélites que resulta en el cese de las transmisiones de señal GNSS. Puede tratarse de un cese de las transmisiones de manera gradual (como una caída constante en la potencia de la señal transmitida sería un cese gradual) o repentino. También puede resultar en un cese retardado (por ejemplo, si un satélite falla de tal manera que ya no puede aceptar nuevas cargas de datos de mensajes de navegación, se degradará hasta que la señal no esté disponible). Estos fallos se subdividen en:
 - *Fallos a largo plazo (LT):* se trata de aquellos fallos que resultan en una pérdida irrecuperable de la señal del satélite. La solución a este tipo de fallo suele ser el lanzamiento de un satélite de reemplazo.

- **Fallos a corto plazo (ST):** se trata de aquellos fallos que resultan en una pérdida temporal de la señal del satélite. La solución a este tipo de fallos suele pasar por el cambio de la configuración del satélite para que haga uso de un subsistema redundante en lugar del subsistema fallido. Esto es posible gracias a que todos los subsistemas críticos de a bordo de un satélite tienen redundancia.

La pérdida de continuidad o no, depende de que el segmento tierra del sistema (GS) GNSS sea capaz de emitir una advertencia antes de la interrupción de la señal. Si logra hacerlo no habrá pérdida de continuidad. Si el GS no puede llegar a emitir una advertencia por adelantado, entonces se producirá una pérdida de continuidad.

La alternativa a esto es tener redundancia de satélites (más de uno, dos normalmente) para cada slot de una constelación, de modo que si uno de los dos falla, el otro sigue estando operativo, haciendo que no se genere interrupción en la continuidad.

- **Fallos de desgaste (*Wear-Out Failures*):** a diferencia de los anteriores, estos fallos son predecibles y, por tanto, programables. Es decir, los satélites van a estar sometidos a desgaste y los fallos por desgaste son una característica de la fase operativa del *fin de la vida* (EOL, del inglés *End Of Life*) útil del satélite.

Estos fallos no van a ocurrir con satélites lanzados recientemente ni con aquellos que se encuentran en la fase operativa de *edad media*. Es habitual lograr alargar la utilidad de los satélites en fase EOL a través de un esfuerzo por parte del segmento de control.

A pesar de que se puede esperar un fallo de este tipo durante la fase EOL de un satélite, es posible que el fallo cause una pérdida de continuidad. Esto ocurriría si se diese el caso de que el segmento de control no haya predicho el fallo de desgaste por adelantado o haya subestimado el esfuerzo necesario para prolongar la vida útil de un satélite en la fase EOL.

- **Fallos leves (*Soft Failures*):** cuando se produce un fallo de este tipo, la señal GNSS sigue estando disponible sin que se emita una alarma que indique que se ha producido un fallo. Por tanto, este tipo de fallos no constituyen, en sí mismos, una pérdida de continuidad.

No obstante, sí hay ciertos fallos leves que pueden derivar en una pérdida de continuidad. Esto es debido a que estos fallos pueden ser detectados autónomamente por los sistemas de a bordo del satélite. Si el satélite detecta el fallo, reaccionará emitiendo una alerta y será esta la que haga que la señal no esté disponible para los usuarios y, por lo tanto, será la causante de la pérdida de continuidad. También puede darse el caso en el que sea el segmento tierra el que detecte y reaccione a un fallo de este tipo, emitiendo una alerta que será la que cause la pérdida de continuidad. Este principio es similar al que el algoritmo RAIM utiliza para las alertas de detección de fallos en un receptor de señal GNSS, haciendo que se genere una pérdida de continuidad cuando el fallo no se puede excluir.

- **Operación y mantenimiento de los satélites (*Satellite O&M Activities*):** las actividades de mantenimiento realizadas rutinariamente en los satélites resultan en la gran mayoría de los casos en la producción de un gran error. Este va a ser causante, desde el punto de vista de la integridad, de generar una emisión de información engañosa.

Este tipo de fallos son planificados de antemano por el segmento tierra, por lo que pueden estar preparados para ellos tomando medidas preventivas, como la emisión de una adver-

tencia con respecto a la interrupción planificada antes del inicio del período de interrupción programada de la señal.

La falta de emisión de la advertencia necesaria antes de interrumpir el servicio programado puede provocar una interrupción en la continuidad de la señal.

3.2.4. Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema de navegación es la probabilidad de que el sistema sea capaz de proporcionar la precisión, integridad y continuidad requeridas en la operación deseada. Es una medida de la capacidad del sistema para proporcionar un servicio utilizable. La disponibilidad se suele medir como el porcentaje de tiempo que el sistema puede ser utilizado.

Considerando la disponibilidad de posición, velocidad y tiempo (PVT) de toda una constelación de satélites, se requiere que se pueda obtener la señal de al menos 4 satélites (para el posicionamiento 3D más el tiempo). Es decir, la disponibilidad de una única señal de un satélite, solo garantiza que se conozca la pseudodistancia de ese satélite [70].

Los factores que más pueden influenciar la disponibilidad son la configuración de la constelación, la visibilidad de los satélites desde la ubicación del usuario y el entorno que lo rodea, pues este en ocasiones puede enmascarar a alguno o a todos los satélites en el cielo.

3.3. Concepto de PBN de la OACI

Una vez vistos los requisitos sobre los que la PBN se cimienta, y que le exige a los sistemas, se pasa a analizar el concepto de PBN de la OACI. Este se compone de la especificación de navegación, la aplicación de navegación y la infraestructura NAVAID, tal y como se muestra en la Figura 3.6.

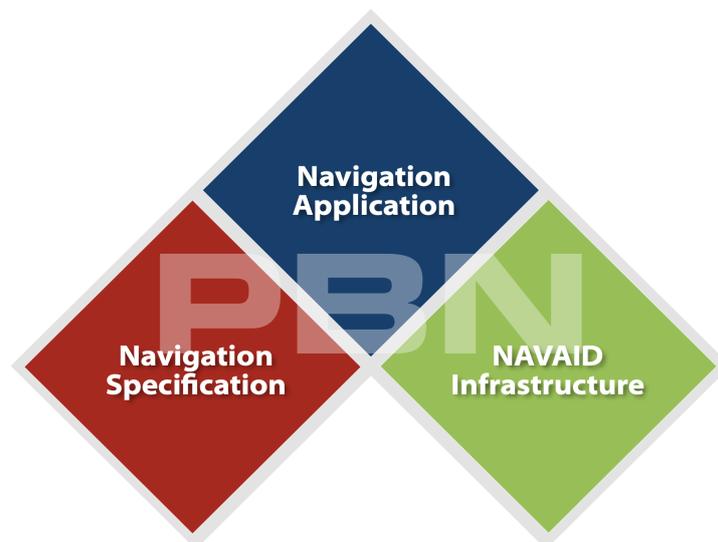


Figura 3.6: Componentes de la PBN según la OACI [1].

A continuación se procede a explicar en mayor profundidad estos elementos que lo componen.

3.3.1. La especificación de navegación

La especificación de navegación puede ser bien una especificación RNAV o una especificación RNP, requiriendo esta última de la capacidad de alerta y monitorización del rendimiento de los sistemas de a bordo. Estas especificaciones de navegación sirven de guía a los estados para desarrollar material de certificación y aprobación operativa.

Las especificaciones indican cuál es el mínimo rendimiento que el correspondiente sistema RNAV o RNP deberá tener en términos de precisión, integridad y continuidad. Además, también detallan qué funcionalidades de navegación y sensores deben integrarse en el sistema y qué requisitos debe cumplir la tripulación del vuelo.

Los requisitos funcionales pueden incluir [10]:

- Indicación continua de la posición de la aeronave con respecto a la trayectoria.
- Visualización de la distancia y el rumbo al waypoint activo.
- Visualización de la velocidad respecto al suelo o el tiempo hasta el waypoint activo.
- Función de almacenamiento de datos de navegación.
- Alertas por fallos del sistema RNAV, RNP o de los sensores.

En un vuelo es posible, además de probable, que se utilicen secuencias de especificaciones RNAV y RNP, tal y como muestra la Figura 3.7. Esto es debido a las diferentes necesidades que se tendrán en cada fase del vuelo en cuanto a precisión y monitorización y alerta.

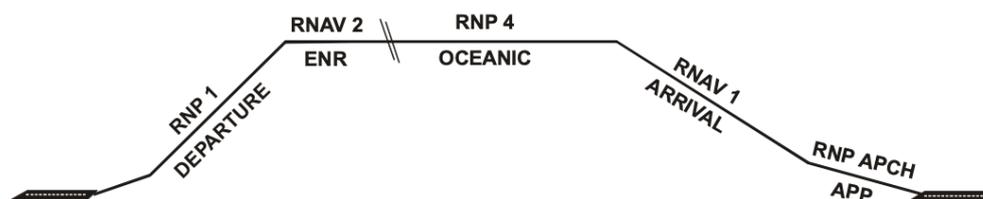


Figura 3.7: Posible secuencia de especificaciones de navegación usadas en diferentes partes de un vuelo [10].

En la Figura 3.8 se observan todas las especificaciones actuales. Las diferentes especificaciones se nombran de forma distinta atendiendo a la zona para la que son aprobadas. Puede tratarse de operaciones oceánicas, continentales remotas, en ruta y en terminal u operaciones de aproximación. A continuación pasa a detallarse en qué consiste el sistema de monitorización y alerta (punto 3.3.1.1) y cómo se designan las especificaciones (puntos 3.3.1.2 y 3.3.1.3).

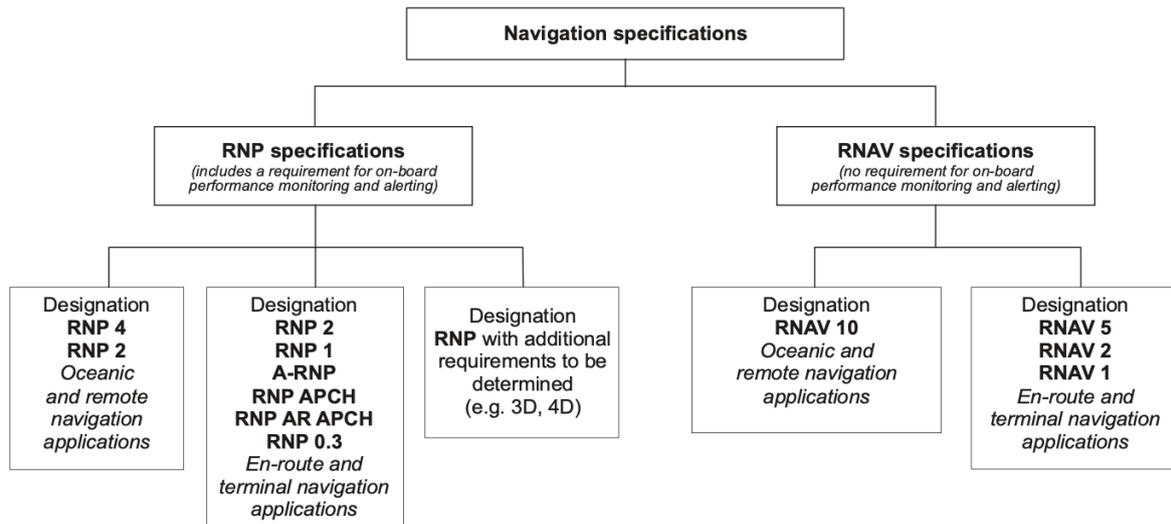


Figura 3.8: Especificaciones de navegación reguladas por OACI [10].

3.3.1.1. Fuentes de error y monitorización del rendimiento a bordo y alerta

Las principales fuentes de error de los sistemas de navegación de área son en el plano lateral y en el plano longitudinal. En el caso de que la aeronave cuente con especificaciones RNP, la monitorización del sistema permite alertar en caso de incumplirse la precisión requerida.

Errores laterales de navegación

Los errores laterales de navegación están relacionados con el seguimiento y posicionamiento de las aeronaves. Los tres principales errores, que pueden observarse en la Figura 3.9 son el error de definición de trayectoria (*Path Definition Error* (PDE)), el error técnico de vuelo (*Flight Technical Error* (FTE)) y el error de sistema de navegación (*Navigation System Error* (NSE)).

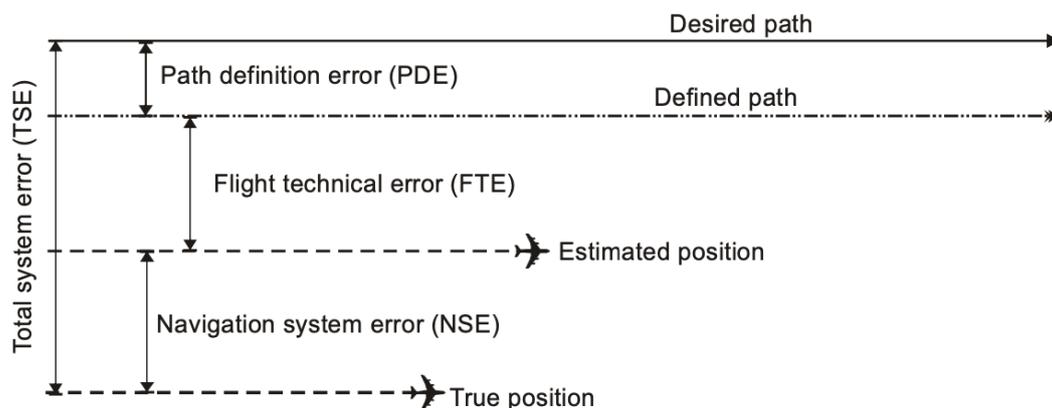


Figura 3.9: Errores laterales de navegación (95 %) [10].

Los tres errores presentan una distribución normal, de media igual a cero, por lo que el error total (TSE) también definirá una distribución normal, cuya desviación estándar será:

$$\sigma_{TSE} = \sqrt{\sigma_{PDE}^2 + \sigma_{FTE}^2 + \sigma_{NSE}^2},$$

siendo σ_{PDE} , σ_{FTE} y σ_{NSE} las desviaciones estándar de cada uno de los errores.

Para la determinación de los errores se usa el sistema geodésico mundial - 1984 (*World Geodetic System* (WGS-84)) o un modelo de referencia equivalente. Sobre este modelo se define una ruta, paso que resulta fundamental para poder calcular el PDE y el FTE.

No obstante, cada uno de los errores es causado por diferentes factores:

- **PDE:** este error se produce cuando la ruta definida en el sistema RNAV no se corresponde con la ruta deseada, es decir, no se sigue la proyección de la trayectoria sobre el terreno. Se incluye dentro del cálculo de este error cualquier error por la resolución de los datos y cualquier desviación cometida por la diferencia entre el modelo de Tierra seleccionado y el modelo de Tierra WGS-84, en caso de que el modelo seleccionado difiera del WGS-84.
- **FTE:** este error, también conocido como *Path Steering Error* (PSE), se da cuando la tripulación aérea o el piloto automático no son capaces de seguir la ruta establecida. El FTE puede ser monitorizado bien por la tripulación o bien por el sistema de piloto automático.
- **NSE:** este error, también conocido como error en la estimación de la posición, no es más que la diferencia entre la posición estimada y la posición real de la aeronave.

Los requerimientos de precisión para una especificación RNAV X, exigen que el error lateral total del sistema (TSE), debe estar en el rango de $\pm X$ NM un 95 % del tiempo. Esto implica que esta misma especificación RNAV X pueda tener también requisitos de precisión longitudinal.

Además, en el caso de que se tratase de una especificación RNP X, esta requeriría la monitorización del rendimiento y debería emitir una alerta en caso de que la precisión no esté siendo lograda.

Errores longitudinales de navegación

En la actualidad, no hay especificaciones de navegación que requieran un control 4D (considerando el tiempo). Por lo tanto, no hay una especie de error técnico de vuelo (FTE) en la dimensión longitudinal. Además, el PDE se considera insignificante para el cálculo de errores longitudinales. Lo que sí definen las especificaciones de navegación actuales es el NSE longitudinal, es decir, se definen los requisitos para la precisión de la trayectoria. Esta precisión se mide como la diferencia entre la posición estimada y la real de la aeronave.

Como se ha visto, el requisito de precisión de las especificaciones RNAV y RNP se define para las dimensiones laterales y longitudinales, a pesar de que en gran parte de los casos su denominación tenga que ver con la precisión lateral.

No obstante, los requisitos de monitorización del rendimiento y alerta en RNP se definen solo para la dimensión lateral. Por ello, el NSE se considera como un error radial, de forma que la

monitorización y alerta se de en todas las direcciones. Mirando la Figura 3.10, la especificación RNP X requeriría que la aeronave estuviese a X NM del waypoint ‘A’ (WPT ‘A’) cuando se ‘alcance’ el mismo.

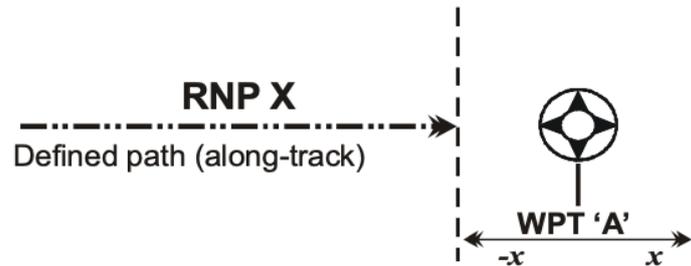


Figura 3.10: Errores longitudinales de navegación (95 %) [10].

Monitorización del rendimiento y alerta

A pesar de que el rendimiento del sistema RNAV puede ser bueno, este se caracteriza por su variabilidad en el funcionamiento. En cambio, los sistemas RNP, al proporcionar la capacidad de monitorización y alerta, son más fiables y predecibles.

Las especificaciones RNP X pueden tener requisitos relativos a la RF (distancia al waypoint) o de FRT (umbral ficticio). Si la especificación no incluye estos requerimientos, entonces no habrá una trayectoria definida y se requerirá de una protección mayor del espacio aéreo.

	RNAV specification	RNP specifications	
		RNP X specification not requiring RF or FRT	RNP X specification requiring RF or FRT
NSE (monitoring and alerting)	Requires no alerting on position error or pilot cross-check of NSE.	Alerting on position accuracy and integrity.	
FTE (monitoring)	Managed by on-board system or crew procedure.	Managed by on-board system or crew procedure. More specific display scaling.	
PDE (monitoring)	Assumed to be zero; the desired path is not defined on turns.		Assumed to be zero; path defined on RF and FRT.
NET EFFECT ON TSE	TSE distribution not bounded. In addition, the wide variation in turn performance results in need for extra protection on turns.	TSE distribution bounded, but extra protection needed on turns;	TSE distribution bounded; no extra protection needed if turns defined by RF or FRT.

Figura 3.11: Monitorización de cada error según la especificación y efecto de estos sobre el error total (TSE) [10].

En la Figura 3.11 se pueden ver los diferentes errores y como estos son monitorizados (o considerados nulos) para el caso de cada una de las especificaciones. También se muestra cuál es el efecto neto de los errores en el error total del sistema (TSE).

3.3.1.2. Especificaciones para operaciones oceánicas, continentales (remoto), en ruta y en terminal

Las especificaciones RNP y RNAV se designan como RNP X y RNAV X, siendo “X” la precisión lateral de navegación (TSE) en millas náuticas que se espera lograr al menos el 95 % del tiempo de vuelo [10].

Si dos especificaciones de navegación comparten el mismo valor para X, se pueden distinguir mediante el uso de un prefijo.

A pesar de que en la gran mayoría de los casos la precisión de navegación se utiliza como parte de la designación de una especificación de navegación, esta es solo uno de los requisitos que se incluyen en la especificación. Es decir, considerando como ejemplo una designación RNAV 5, esta especificación de navegación se refiere a que la precisión lateral requerida es de 5 NM, pero este es solo uno de los muchos requisitos que se comprenden en ella. Al igual que todas las especificaciones de navegación, RNAV 5 también especifica la precisión longitudinal requerida y todos los requisitos del sistema de navegación aérea y de la tripulación de vuelo.

El hecho de que los requisitos funcionales y de rendimiento se definan para cada una de las especificaciones de navegación hace que una aeronave aprobada para RNP no lo esté necesariamente para RNAV. Tampoco se cumple que una aeronave aprobada para una especificación con un requisito de precisión estricto vaya a ser automáticamente aprobada para un requisito menos estricto. Es decir, un avión aprobado para RNP 1 no estará automáticamente aprobado para RNP 4, pues puede no cumplir con algunos de los requisitos funcionales del requisito menos estricto.

Cabe mencionar que la designación de RNP 10 no incluye requisitos para la supervisión y alerta del rendimiento a bordo, por lo que es inconsistente y se debería cambiar a RNAV 10, tarea que no se realiza por ser extensa y costosa. No obstante, sí se muestra como RNAV 10 en la Figura 3.8 y va a considerarse así en el documento.

Además, existen otras excepciones al uso de estas especificaciones para operaciones oceánicas o en zonas remotas continentales. Los casos más destacados son el del Atlántico Norte y la región norte de Canadá. Hasta que se implemente allí la PBN, los aviones que operan en estos espacios aéreos deben cumplir con una especificación mínima de rendimiento de navegación (*Minimum Navigation Performance Specifications* (MNPS)). Este es un requerimiento especial que exige a las aeronaves estar equipadas con un sistema que permite una precisión mejorada para el tracking de la posición. MNPS no se incluye en la Figura 3.8 debido a que no se prevén futuras implementaciones, además de que en la actualidad es equipamiento obligado [71].

Se procede ahora a hacer una subdivisión más concreta de las especificaciones usadas en cada tipo de operación.

Operaciones oceánicas o continentales remotas

En la Figura 3.8 puede verse que RNP 2 aparece como especificación utilizada para operaciones oceánicas y continentales remotas, además de para operaciones en ruta. No obstante, el uso de esta especificación o la A-RNP (*Advanced RNP*) para operaciones oceánicas y continentales remotas es menos común. Por ello, no se tratará más a fondo en este apartado.

Las otras especificaciones utilizadas son RNAV 10 y RNP 4. Ambas funcionan utilizando sistemas de navegación de gran rango (*Long Range Navigation System* (LRNS)), que son los

sistemas de navegación inercial (INS), los sistemas de navegación por satélite (GNSS) y los sistemas de gestión de vuelo del sistema de referencia inercial (IRS FMS).

- **RNAV 10:** esta especificación implica que, como se ve en la Figura 3.12, la precisión lateral requerida será de 10 NM, unos 18,52 km. Se basa en una separación de 50 NM laterales y longitudinales, que es equivalente a 92,6 km.

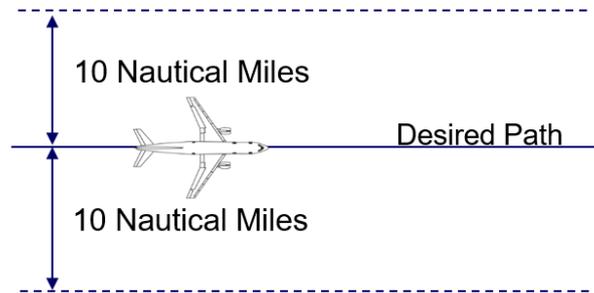


Figura 3.12: Precisión lateral de RNAV 10 [11].

RNAV 10 especifica que los aviones que operan en áreas oceánicas y remotas deben estar equipados con al menos dos LRNS independientes. Estos sistemas deberán tener una integridad que no presente una probabilidad inaceptable de información engañosa.

- **RNP 4:** en los inicios, esta especificación utilizaba unos mínimos de separación lateral y longitudinal de 30 NM. En la actualidad, estos mínimos son de 23 NM, unos 42,59 km.

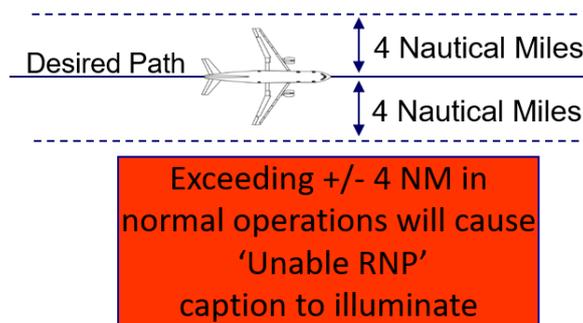


Figura 3.13: Precisión lateral de RNP 4 [11].

Tal y como se ve en la Figura 3.13, el error lateral del sistema total (TSE) deberá ser de ± 4 NM (7,41 km) durante al menos el 95 % del tiempo total de vuelo. La probabilidad de que se exceda este límite es de 10^{-7} , y en tal caso se emitiría una alerta.

Las operaciones que se realicen utilizando la especificación RNP 4 en un espacio aéreo oceánico o remoto deberán tener también al menos dos LRNS independientes. Al igual que en el caso anterior, la integridad del sistema deberá ser la suficiente como para no proporcionar información engañosa en un porcentaje inaceptable de tiempo. Además, la aeronave con esta especificación deberá estar equipada con un sistema de comunicación de enlace de datos piloto-controlador (CPDLC) o tener comunicaciones directas por voz con

el controlador. Además, también deberán contar con un sistema de vigilancia automática, como el ADS-B.

Operaciones en ruta

Hay seis especificaciones que se utilizan en operaciones en ruta [72]:

- **RNAV 5:** requiere una precisión lateral de ± 5 NM (9,26 km) sin el requisito de monitorización del rendimiento y alerta. Puede utilizarse en espacio aéreo con vigilancia o sin ella.

El proveedor de servicios de navegación aérea (ANSP) tiene que tener comunicaciones directas por voz con el piloto.

- **RNAV 2 & 1:** ambas especificaciones tienen los mismos requisitos técnicos, a excepción de la precisión lateral, que será de ± 2 NM (3,7 km) y ± 1 NM (1,85 km) respectivamente.

Estas especificaciones se desarrollan para su uso principalmente en operaciones de navegación de área en entornos radar. No obstante, también pueden usarse en entornos fuera de radar si se garantiza la seguridad, teniendo en cuenta la falta de monitorización y alerta.

En operaciones con esta especificación se requiere que las comunicaciones se lleven a cabo de forma directa por voz con el controlador.

GNSS y DME/DME son las infraestructuras que soportan estas especificaciones. No obstante, la mayoría de los sistemas RNAV actuales priorizan el GNSS.

- **RNP 2:** esta especificación está destinada a áreas geográficas con poca o ninguna infraestructura NAVAID en tierra.

RNP 2 es comúnmente utilizada para aplicaciones en ruta, pero también se puede utilizar para operaciones oceánicas/remotas. En este último caso, el requisito de continuidad será menos estricto, puesto que el tráfico estará mayormente compuesto por aeronaves de transporte a gran altitud. En cambio, para aplicaciones en ruta, el tráfico es mayormente formado por aeronaves de aviación general.

El máximo error lateral del sistema permitido antes de que se emita una alerta deberá ser de ± 2 NM (3,7 km) durante al menos el 95 % del tiempo total de vuelo.

- **RNP 0.3:** esta especificación está destinada al uso en helicópteros. Se sustenta sobre el hecho de que la gran mayoría de los helicópteros IFR ya están equipados con receptores SBAS y aviónica moderna.

Se concibe como una especificación única para todas las fases del vuelo, que tiene una precisión lateral de $\pm 0,3$ NM (555,6 m). Con esta precisión se han podido habilitar muchas nuevas operaciones, como operaciones en áreas protegidas reducidas, operaciones de baja altura en entornos con muchos obstáculos. Además, esta especificación también ha permitido una mejor y más eficiente transición en ruta-terminal y mayor puntualidad.

- **A-RNP:** esta especificación nace con el objetivo de cubrir diversas aplicaciones en varias fases de vuelo, a excepción de la aproximación final. Se concibe para utilizarse en entornos radar o con sistemas GNSS.

En terminal admite una precisión de $\pm 0,3$ NM (555,6 m), por lo que desempeña un papel importante en operaciones con pistas paralelas. En aplicaciones continentales está

destinada a su uso en espacios aéreos de alta densidad donde se proporciona un servicio de vigilancia ATS.

Operaciones en terminal

Para operaciones en terminal, pueden utilizarse las siguientes especificaciones [73]:

- **RNAV 1, RNP 0.3 y A-RNP:** explicadas anteriormente en el apartado de operaciones en ruta.
- **RNP 1:** esta especificación permite la conexión entre el espacio aéreo superior y el área terminal de un aeropuerto. Puede ayudarse de una infraestructura terrestre NAVAID o no, dado que se basa en una infraestructura GNSS.

La especificación fue concebida para apoyar los procedimientos estándar de llegada (STAR) y salida (SID), aunque también se puede emplear como soporte para la fase inicial e intermedia de aproximación.

Esta especificación requerirá que la aeronave esté equipada con un sistema capaz de realizar monitorización del rendimiento y de emitir alertas en caso de no cumplirse los mínimos. Además, el sistema deberá ser capaz de predecir la detección de fallos, por lo que deberá utilizar información del estado de los satélites GNSS.

Se utilizará un límite de alerta horizontal u otro dependiendo de la operación. Será de ± 1 NM (1,85 km) en radio 30 NM (55,56 km) alrededor del aeropuerto y de ± 2 NM (3,7 km) en caso contrario.

3.3.1.3. Especificaciones para operaciones de aproximación

Las especificaciones RNP se designan utilizando un prefijo (RNP) y un sufijo (i.e. APCH o AR APCH). Estas especificaciones cubren todos los segmentos de la aproximación instrumental.

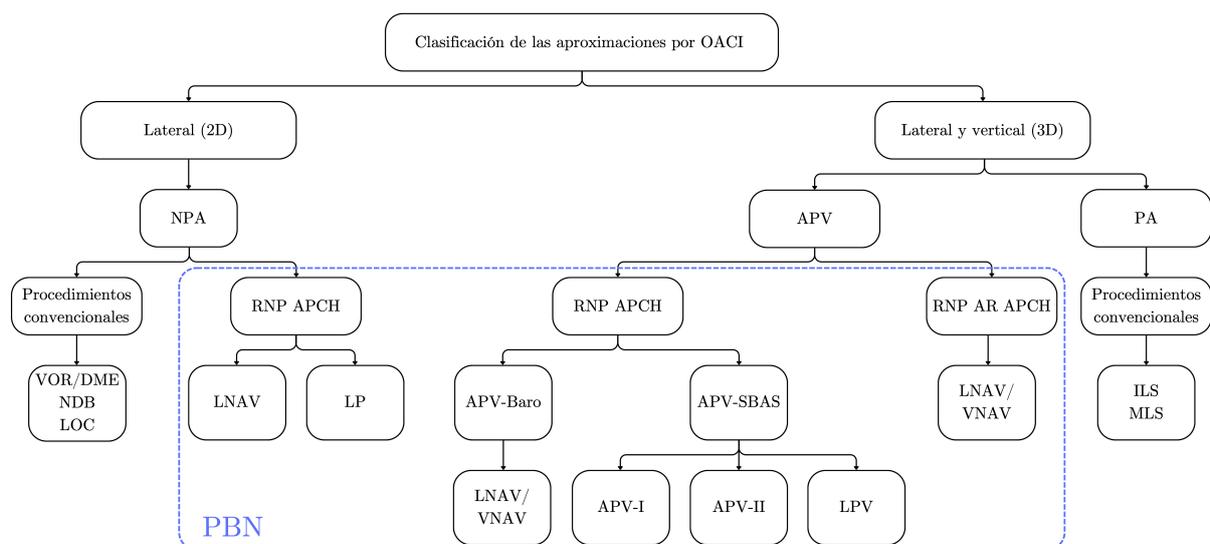


Figura 3.14: Clasificación de los procedimientos de aproximación [12, 13].

No hay especificaciones de aproximación RNAV debido a la necesidad de monitorización y alerta para este tipo de operaciones.

Para aproximación, los procedimientos pueden clasificarse como se ve en la Figura 3.14. De todos ellos, pasan a comentarse los que utilizan las especificaciones RNP, que son los incluidos dentro del ámbito de la PBN. Todos estos tienen en común que se basan en la navegación satelital, haciendo uso de los sistemas GNSS, que se explican en el Capítulo 4. Según la especificación, el sistema correspondiente se nutrirá de diferentes aumentaciones u otras fuentes para aportar mayor o menor precisión.

RNP APCH

En la Figura 3.14, esta especificación aparece por duplicado bajo los procedimientos de no precisión (NPA), que ofrecen solo guiado lateral y bajo las aproximaciones con guiado vertical (APV):

- **RNP APCH NPA:** los procedimientos de no precisión se realizan hasta la denominada altitud/altura mínima de descenso (MDA/H), que siempre será superior a la altitud/altura del punto de frustrada (MAP). Son procedimientos en el que se ofrece un guiado 2D, es decir, solo exigen precisión lateral. La precisión requerida aumenta a medida que el avión se acerca a la pista.

Se distinguen dos tipos de procedimientos según las ayudas a la navegación usadas: LNAV y LP. Los mínimos LNAV y LP pueden aparecer publicados conjuntamente en la misma carta de aproximación, aunque los mínimos LP solo aparecerán si estos son menores que los LNAV [74].

- Aproximaciones LNAV: en estos procedimientos se define la ruta lateralmente y se usan las constelaciones GNSS para el guiado.
- Aproximaciones LP: en estos procedimientos se utiliza el SBAS para mejorar la precisión. No es un procedimiento habitual, pues surge como derivado al LPV, que será explicado a continuación. Se trata de un procedimiento LPV en el que no se puede asegurar el guiado vertical.

- **RNP APCH APV:** son procedimientos con guiado vertical, que ofrecen un guiado 3D, es decir, requieren precisión lateral y vertical. Estos se realizan hasta la denominada altitud/altura de decisión (DA/H), que también será más alta que la altitud/altura del punto de frustrada (MAP).

Se distinguen dos tipos de procedimientos según el guiado vertical utilizado: APV-Baro y APV-SBAS.

- Aproximaciones APV-Baro: se trata de procedimientos LNAV, en los que además se incluye un guiado vertical, que se realiza mediante la funcionalidad VNAV, que utiliza inputs barométricos. También denominados LNAV/VNAV.
- Aproximaciones APV-SBAS: estos procedimientos son posibles gracias a la aumentación del SBAS, que proporcionará guiado horizontal y vertical. Se definen tres diferentes tipos de procedimiento con tres diferentes requisitos de precisión: APV-I, APV-II y LPV.

Para el caso de LPV, el guiado horizontal es equivalente al localizador del ILS y el vertical se realiza mediante un patrón geométrico espacial [75]. Sobre esta especificación es sobre la que se fundamentan los procedimientos LPV-200, que están ahora en fase de implantación. LPV-200 permite una altitud/altura de decisión (DA/H) de 200 pies (60,96 m). Esto sería equivalente al uso de un procedimiento ILS CAT I.

RNP AR APCH

La especificación RNP AR APCH es igual que APV-Baro por lo que a método de funcionamiento respecta. No obstante, RNP AR APCH se utiliza para aeropuertos donde existen limitaciones por obstáculos, terreno u otras dificultades que hacen que la aproximación no pueda trazarse con una línea recta, a diferencia de lo que sucede con las especificaciones RNP APCH [76].

Esta especificación no está concebida para ser utilizada de forma general en cualquier aeropuerto. Las siglas AR de su nombre se refieren a que el procedimiento requiere autorización (*Authorisation Required*). Por tanto, este procedimiento se utilizarán para procedimientos muy exigentes, para los que se requerirá aprobación específica para la aeronave, entrenamiento específico de la tripulación y, por lo general, una evaluación de seguridad operacional de vuelo (*Flight Operational Safety Assessment* (FOSA)). Todo lo anterior junto a los estrictos criterios de rendimiento y elegibilidad hacen que, a pesar de que sean procedimientos con riesgo elevado, este se pueda mitigar.

3.3.2. La aplicación de navegación

La aplicación de navegación consiste en el uso conjunto de la infraestructura NAVAID existente (terrestre o satelital: VOR, DME, GNSS...) y la especificación de navegación para las rutas ATS, los procedimientos instrumentales o el espacio aéreo. El fin es intentar que las operaciones derivadas de estas aplicaciones puedan atenderse a los requisitos establecidos por la PBN.

Se cumple que una operación en la que se emplea un sistema RNAV se sustenta sobre una especificación RNAV, al igual que una operación que utiliza un sistema RNP irá acompañada de su correspondiente especificación RNP.

3.3.3. La infraestructura NAVAID

La infraestructura NAVAID se compone de una extensa red de dispositivos de ayuda a la navegación espaciales y terrestres. Las ayudas espaciales son los sistemas GNSS, junto con todos los elementos y sectores que los conforman, que se analizarán en el Capítulo 4. Las ayudas terrestres son:

- **VOR:** es un sistema que opera en la banda de frecuencias VHF. Consta de varias antenas radiales y una central. Las antenas radiales emiten una señal direccional, cada una en una dirección y frecuencia; mientras que la antena central emite una sola señal omnidireccional en otra frecuencia.

Sabiendo que la señal de la antena central es igual para todas las direcciones, comparándola con la señal recibida de la antena radial direccional, el sistema es capaz de ubicar a la

aeronave con respecto al VOR. Su precisión aproximada es de $\pm 0,4^\circ$ el 95 % del tiempo.

- **DME:** es un sistema que opera en la banda de frecuencias UHF. Su funcionamiento es similar al de un radar primario o secundario, pero en esta ocasión, el interrogador es el sistema de a bordo de la aeronave. Calcula la distancia en línea recta a la antena receptora midiendo la diferencia de tiempo entre emisión y recepción. Tiene una precisión aproximada de 185 m.

Toda la infraestructura NAVAID debe de responder a los requisitos de rendimiento que requiere PBN. Por este motivo, otras ayudas a la navegación no se incluyen dentro de los planes de la PBN [77]. Estas son:

- **NDB:** este sistema tiene más de 70 años de antigüedad y no es capaz de cumplir con los requisitos de precisión exigidos.
- **Sistemas de aproximación de precisión (*Precision Approaches (PA)*):** en la Figura 3.14 ya se veía que la PBN solo contempla las aproximaciones con guiado vertical (APV). Por tanto, otros sistemas de PA, como el ILS o el MLS, no se consideran.

Solo con los NAVAIDs terrestres se puede obtener la posición de una aeronave usando combinaciones de antenas VOR y DME. No obstante, durante la 11^a Conferencia de Navegación Aérea (2003) de la OACI, la Conferencia ya recomendó una transición global a la Navegación Aérea basada en GNSS. Esto ocurre, porque a pesar de que ahora mismo las NAVAIDs de tierra sí son capaces de proporcionar la precisión demandada en cada fase de vuelo, el continuo crecimiento del tráfico aéreo y la demanda del espacio aéreo, terminará por endurecer los requisitos de la PBN, y las constelaciones de satélites (GNSS) son más capaces de reaccionar ante este crecimiento. Ellas tienen el potencial de apoyar todas las fases del vuelo proporcionando una navegación global sin fisuras, eliminando así la necesidad de mantener los diversos sistemas terrestres y aéreos que fueron diseñados para cumplir con los requisitos específicos para ciertas fases de vuelo.

En la actualidad, la infraestructura NAVAID está pasando por un proceso de transición que apunta en la dirección de convertir los GNSS en la principal infraestructura de navegación para PBN para 2030.

El Plan Global de Navegación Aérea para los sistemas de Communication, Navigation and Surveillance (CNS) y Air Traffic Management (ATM) [78] reconoce el *Global Navigation Satellite System* (GNSS) como un elemento clave de estos sistemas, así como una base sobre la que ofrecer servicios de navegación aeronáutica mejorados. A continuación, en el Capítulo 4, estos sistemas se analizarán en profundidad.

Capítulo 4

GNSS

Los sistemas globales de navegación por satélite (*Global Navigation Satellite System* (GNSS)) son constelaciones de satélites que tienen la capacidad de proporcionar información precisa sobre la posición y el tiempo. Esta información es usada por los receptores de las señales para posicionarse.

Las aplicaciones de estos sistemas son muchas y de diferentes ramas de la ciencia y la tecnología: la conducción autónoma, el vuelo autónomo, aplicaciones para mapeado y geodesia, aplicaciones militares, navegación marítima, el control de tráfico aéreo (ATC)...

Hay un total de cuatro sistemas GNSS: el archiconocido GPS estadounidense, el GLONASS ruso, el chino BeiDou y el europeo Galileo. La mayoría de estos sistemas son de origen militar, a excepción de Galileo, de origen civil. A estos cuatro se le suman los dos sistemas regionales de navegación por satélite: el IRNSS indio y el QZSS japonés. Todos los diferentes sistemas tienen en común que se subdividen en un segmento espacial (*Space Segment* (SS)), un segmento tierra (*Ground Segment* (GS)) y un segmento usuario (*User Segment* (US)).

En este capítulo va a profundizarse en el principio de funcionamiento de los sistemas GNSS. Se verá también como se organizan los diferentes segmentos de los cuatro sistemas introducidos y qué ventajas y limitaciones presentan estos frente a la navegación convencional.

4.1. Principio de funcionamiento

El objetivo último de los sistemas de navegación satelital es conseguir ofrecer toda la información necesaria para que el receptor pueda calcular su posición utilizando métodos de triangulación.

El funcionamiento de las constelaciones GNSS se basa en un observable básico: el tiempo que tarda la señal en viajar del satélite (emisor) al usuario (receptor). Es decir, el tiempo será una incógnita a calcular.

Con ello, habrá un total de cuatro incógnitas: la x , y , z del receptor y el tiempo invertido en la transmisión. Para poder realizar el cálculo, la x , y , z de la posición del emisor (satélite) serán datos. Estos datos son emitidos por los propios satélites de las constelaciones GNSS en forma de señal de navegación.

Se logra que esta señal de navegación transporte la información necesaria mediante la modulación de diferentes señales. Así la señal está compuesta por:

- **Frecuencia portadora o portadora:** onda de radio sinusoidal que se transmite continuamente sobre la que se realizará la modulación. Un mismo sistema emite en dos o más frecuencias, que serán distintas según el sistema GNSS o de navegación regional del que se hable. Este hecho hace que la asignación de las bandas de frecuencia se complique, puesto que no se quieren generar interferencias.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunications Union* (ITU)), agencia perteneciente a Naciones Unidas, es la encargada de la coordinación del uso común del espectro radioeléctrico. Las franjas de este que se le asignan al Servicio de Radionavegación Aeronáutica (*Aeronautical Radio Navigation Service* (ARNS)) son la banda L superior (1559 a 1610 MHz) e inferior (1151 a 1214 MHz) [16].

Para lidiar con la saturación del espectro, la mayoría de los sistemas GNSS utilizan técnicas de acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access* (CDMA)), para lograr así que el mismo canal de transmisión pueda ser ocupado por varias señales.

- **Código de rango o código:** secuencia o código binario de ruido pseudoaleatorio (*Pseudo-Random Noise* (PRN)) que extiende la señal sobre el espectro. Se repite cada cierto periodo de tiempo (normalmente del orden de milisegundos).

Estos códigos de PRN presentan una propiedad muy importante: la correlación de dos códigos es máxima cuando estos están completamente alineados. Esto será lo que permita conocer el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal.

- **Datos o mensaje de navegación:** es también un código binario que codifica un mensaje en el que se detalla cierta información sobre el satélite del que se recibe la señal. El mensaje se compone de las efemérides, el almanaque, los parámetros de sesgo del reloj, el estado de salud del satélite e información complementaria.

Las efemérides son los parámetros que permiten calcular la posición del satélite en un momento determinado.

El almanaque es un conjunto reducido de parámetros (comparado con las efemérides) que permite una primera aproximación a las coordenadas de los satélites, con una precisión de $\pm 1-2$ km ($1 - \sigma$) [79].

Con el mensaje de navegación, la posición del satélite podrá ser conocida. Para proceder al cálculo de la posición del receptor, se requiere como dato la distancia de este a cada uno de los satélites. Conociendo el tiempo de propagación (ΔT) de las señales se puede obtener dicha distancia.

Multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), se obtiene la Ecuación 4.1, que permite calcular una primera aproximación de la distancia entre emisor-receptor, conocida como pseudodistancia R .

$$R = c \Delta T \quad (4.1)$$

El cálculo de ΔT se puede realizar de dos formas diferentes:

- **La correlación del código:** el código de ruido pseudoaleatorio de los satélites es conocido previamente por parte de los receptores. De esta forma, en recepción se genera una réplica del código emitido, pudiendo comparar así para obtener el desfase temporal del código.

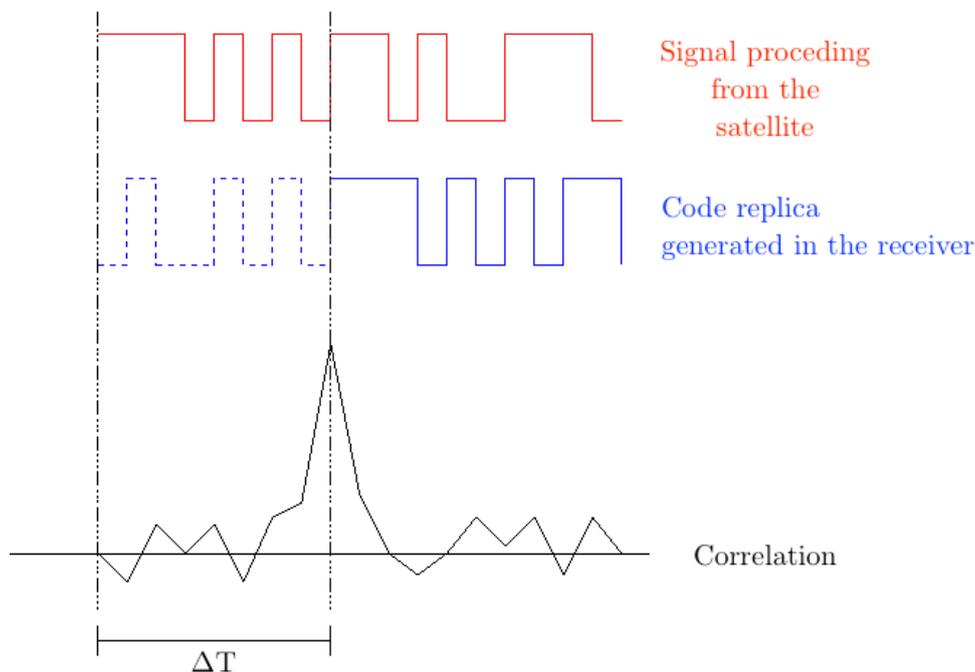


Figura 4.1: Determinación del tiempo de propagación de la señal por correlación del código [14].

En la Figura 4.1 se ve como la correlación es máxima cuando se alinea el código recibido en la señal procedente del satélite con el código réplica generado en el receptor. Por tanto, esta medida del desfase temporal será el ΔT de propagación de la señal.

- **Diferencia de fase de la portadora:** la frecuencia de la portadora también permite calcular la distancia, y además, de forma más precisa. Sin embargo, en este caso aparece una incertidumbre igual a un número entero de longitudes de onda (λN), que cambia cada vez que el receptor se desconecta y conecta de la señal.

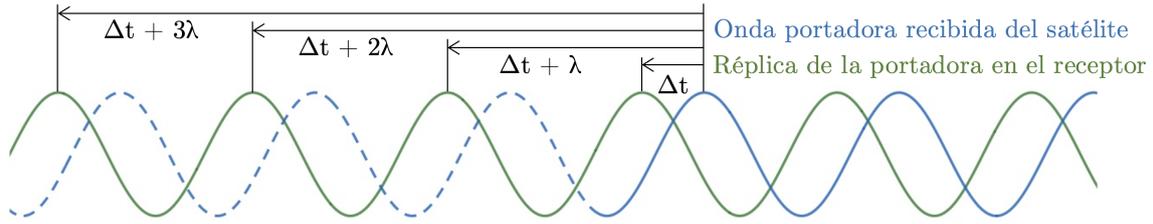


Figura 4.2: Determinación del tiempo de propagación de la señal por diferencia de fase.

Como se ve en la Figura 4.2, entre la portadora y la réplica existe un desfase Δt , pero el tiempo de propagación puede venir dado por la Ecuación 4.2, donde N es un número entero de longitudes de onda.

$$\Delta T = \Delta t + \lambda N \quad (4.2)$$

No obstante, esta ΔT calculada está sujeta a los errores que los relojes del satélite y/o el receptor puedan tener. Es decir, tanto la réplica del código como la de la portadora se producen en el receptor de forma simultánea al código y a la portadora que se generan en el satélite. Por ello, los errores de los relojes harán que la simultaneidad no sea tal y aplicarán un error temporal que se verá traducido en un error sobre la distancia.

Dependiendo del tipo de sincronización que los relojes hayan utilizado para calcular ΔT , se procederá de forma distinta para poder eliminar este error temporal [80]:

- **La correlación del código:** si se realiza la medición del tiempo de propagación por correlación del código y se tiene en cuenta que emisor y receptor tienen escalas temporales distintas, la distancia se calcularía de la forma en la que aparece en la Ecuación 4.3.

$$R = c \cdot (T_R(t_i) - T^S(t^j)) \quad (4.3)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, $T_R(t_i)$ es el tiempo en recepción medido con la escala temporal del reloj del receptor t_i y $T^S(t^j)$ es el tiempo en emisión medido con la escala temporal del reloj del satélite t^j .

Se supone ahora que el tiempo en el satélite es $T^S(t^j) = t^j - \delta^j$ y el tiempo en recepción es $T_R(t_i) = t_i - \delta_i$, donde t^j y t_i son tiempos sin errores de sincronización y δ^j y δ_i son los errores. Se obtiene ahora la Ecuación 4.4.

$$R = c \cdot (t_i - \delta_i - t^j - \delta^j) = c \cdot \Delta t + c \cdot \Delta \delta = \rho + c \Delta \delta \quad (4.4)$$

que también se puede escribir de la forma de la Ecuación 4.5.

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c \Delta \delta_i^j(t) \quad (4.5)$$

donde $R_i^j(t)$ es la pseudodistancia medida entre el receptor en i y el satélite en j , $\rho_i^j(t)$ es la distancia geométrica entre el satélite y el punto de observación y $\Delta \delta_i^j(t)$ representa las

desviaciones de los relojes del satélite y del receptor. Por tanto, $c\Delta\delta_i^j(t)$ es una distancia que está asociada a los errores de sincronización de los relojes.

La distancia geométrica entre el receptor y el satélite se puede expresar con la Ecuación 4.6

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (4.6)$$

donde $X^j(t)$, $Y^j(t)$ y $Z^j(t)$ son las coordenadas del vector posición del satélite y X_i , Y_i , Z_i son las tres coordenadas incógnitas del receptor en una época (instante) t .

Con esto, habría un total de cinco incógnitas: las coordenadas del receptor (X_i, Y_i, Z_i) y las desviaciones de los relojes (δ^j y δ_i). Sin embargo, las desviaciones del reloj del satélite siguen un modelo matemático: se trata de un polinomio de segundo grado que puede modelarse con tres coeficientes (a_0 , a_1 y a_2), que son conocidos y transmitidos por medio del mensaje de navegación. Se modela el error respecto a un tiempo de referencia t_c . Por tanto, las desviaciones del reloj del satélite para una época t vendrán dadas por la Ecuación 4.7.

$$\delta^j(t) = a_0 + a_1(t - t_c) + a_2(t - t_c)^2 \quad (4.7)$$

Si consideramos ahora una sola época t , habrá cuatro incógnitas: las tres coordenadas de la ubicación del receptor (X_i, Y_i, Z_i) y las desviaciones su reloj (δ_i). Reorganizando la Ecuación 4.5 dejando a un lado las incógnitas, se obtiene la Ecuación 4.8.

$$R_i^j(t) - c\delta^j(t) = \rho_i^j(t) - c\delta_i(t) \quad (4.8)$$

Cada satélite adicional añadirá una nueva ecuación. No obstante, las incógnitas seguirán siendo las mismas tres coordenadas del receptor y la desviación de su reloj, pues las coordenadas del nuevo satélite y las desviaciones del reloj satelital podrán ser calculadas con su mensaje de navegación.

Por tanto, las incógnitas siempre serán las mismas cuatro, independientemente del número de satélites. En cambio, cada nueva época (instante de medición) añade una nueva incógnita, puesto que las desviaciones del reloj del receptor habrán cambiado de una época a otra.

Para poder resolver la Ecuación 4.8 es necesario que el número de ecuaciones sea mayor o igual que el número de incógnitas. Si n_j es el número de satélites y n_t el número de épocas, habrá disponibles $n_j \cdot n_t$ ecuaciones de observación. Se necesita:

$$n_j \cdot n_t \geq 3 + n_t$$

Para una época ($n_t = 1$), se necesitaría como mínimo (teóricamente) cuatro satélites que puedan ser vistos simultáneamente si el receptor se encuentra estático.

En cambio, si se pretende situar un receptor que está en movimiento, sus tres coordenadas cambiarán para cada época, haciendo que el número de incógnitas de las coordenadas de la estación de recepción sea $3n_t$. Sumando el número n_t de incógnitas del error del reloj, el número total de incógnitas es $4n_t$. En este caso, quedaría la siguiente configuración:

$$n_j \cdot n_t \geq 4n_t$$

que es equivalente a $n_j \geq 4$. En decir, que la posición y velocidad de un receptor móvil se podrá determinar instante a instante si dicho receptor tiene en todo momento visión de al menos cuatro satélites.

- **Diferencia de fase de la portadora:** si se realiza la medición del tiempo de propagación por diferencia de fases de la portadora y se tiene en cuenta que emisor y receptor tienen escalas temporales distintas, la distancia se calcularía de la forma en la que aparece en la Ecuación 4.9.

$$\Phi_i^j(t) = \lambda \cdot \phi_i^j(t) = \rho_i^j(t) + \lambda N_i^j + c\Delta\delta_i^j(t) \quad (4.9)$$

donde $\Phi_i^j(t)$ es la medida de la diferencia de fase, λ es la longitud de onda, N_i^j es el número entero del que se hablaba en la Ecuación 4.2 y $c = \lambda \cdot f^j$, siendo f^j la frecuencia de la señal del satélite.

Si del mismo modo que para el caso anterior, en la Ecuación 4.9 se sustituye $\Delta\delta_i^j(t)$ por $\delta^j - \delta_i$ y se reorganiza de modo que se quedan las incógnitas a un lado, se obtiene la Ecuación 4.10.

$$\Phi_i^j(t) - c\delta^j(t) = \rho_i^j(t) + \lambda N_i^j - c\delta_i(t) \quad (4.10)$$

De nuevo, las desviaciones del reloj del satélite se consideran conocidas, pues se podrán modelar con el mismo polinomio de segundo grado de la Ecuación 4.7.

Tomando en cuenta que para poder resolver la Ecuación 4.10 se deberán tener más ecuaciones que incógnitas, para n_j satélites, n_t épocas y un receptor, se tendrá que el número de medidas será $n_j n_t$. Las incógnitas se muestran a continuación debajo de cada elemento de la Ecuación 4.10:

$$\begin{array}{rcl} \Phi_i^j(t) - c\delta^j(t) = \rho_i^j(t) + \lambda N_i^j - c\delta_i(t) & & (4.10) \\ n_j n_t & \geq 3 & + n_j + n_t \end{array}$$

De nuevo, igual que en el caso anterior, cada nueva época traerá consigo una nueva incógnita, pues el desvío del reloj del receptor cambia de una época a otra. No obstante, en este caso, la adición de nuevos satélites también generará nuevas incógnitas asociadas al número de longitudes de onda de desfase en sincronización.

Esto hace que la solución para una sola época solo sea posible si las incertidumbres por N_i^j se desprecian, quedando un modelo equivalente al anterior. Si se quieren determinar estas indeterminaciones, se requerirá de un mínimo de $n_j = 2$ satélites y $n_t = 5$ épocas. En la práctica, se necesitarán $n_j = 4$ satélites para obtener resultados razonables, lo que requerirá de $n_t \geq 3$ épocas.

Así, este modelo de medida por diferencia de fases de la portadora podrá utilizarse para posicionar un receptor que está en movimiento, si las incertidumbres N_i^j han sido resueltas anteriormente en estático, utilizando el modelo de medida por correlación del código. Para este caso, teniendo en cuenta que sus tres coordenadas cambiarán para cada época y que N_i^j no es incógnita, se tendrá:

$$n_j n_t \geq 3n_t + \eta_j + n_t$$

$$n_j n_t \geq 4n_t$$

obteniendo $n_j \geq 4$ al igual que en el modelo de medida temporal por correlación del código. No obstante, se tiene que tener en cuenta que las incertidumbres para este caso han sido calculadas antes en estático.

Aun con esta primera corrección, la pseudodistancia R sigue estando sometida a múltiples errores aún no tomados en cuenta. En la Figura 4.3 se ve que además de los errores de los relojes, hay errores debidos a los retrasos del hardware de los equipos (normalmente despreciables), errores por el retraso ionosférico, por el retraso troposférico, por *multipath* y por ruido.

Para ello, los sistemas GNSS utilizan modelos de predicción para eliminar en la medida de lo posible los errores por retrasos ionosféricos, troposféricos y los efectos del *multipath* [81].

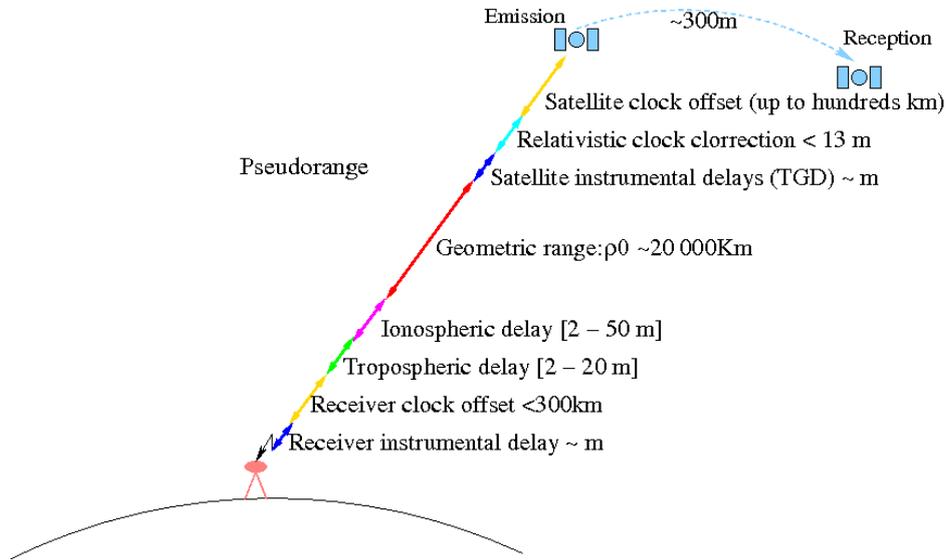


Figura 4.3: Errores que afectan a la pseudodistancia [15].

Si se tomasen en cuenta todos los errores, el cálculo de la pseudodistancia tomaría la forma de la Ecuación 4.11 si el reloj se sincroniza por correlación del código [14].

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c(\delta_i(t) - \delta^j(t)) + T + \alpha_f STEC + K_i + K^j + M + \varepsilon \quad (4.11)$$

donde:

T = retraso troposférico.

$\alpha_f STEC$ = retraso ionosférico dependiente de la frecuencia.

K_i y K^j = retrasos del hardware del receptor y del satélite, respectivamente.

M = efecto *multipath*.

ε = ruido.

Si el reloj se sincroniza por diferencia de fases, se tiene la Ecuación 4.12 [14].

$$\Phi_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c(\delta_i(t) - \delta^j(t)) + T - \alpha_f STEC + k_i + k^j + \lambda N_i^j + \lambda w + M + \varepsilon \quad (4.12)$$

donde:

λw = efecto *wind-up* por la polarización circular de la señal.

k_i y k^j = retrasos del hardware del receptor y del satélite, respectivamente.

En este caso, en la Ecuación 4.12 el símbolo del término ionosférico es contrario porque en lugar de causar un retraso, causa un adelanto de la señal.

4.2. Sistemas GNSS

Ya en la introducción de este capítulo se comentaba la existencia de cuatro sistemas GNSS: Galileo, GPS, GLONASS y BeiDou. Estos, pese a ser el mismo tipo de sistema en esencia, sí presentan diferencias notorias entre sí, las cuales pasan a describirse a continuación.

En la Figura 4.4 se muestran todas las frecuencias de las diferentes portadoras de cada uno de los sistemas globales y regionales de navegación por satélite.

Se observa como los diferentes sistemas utilizan diferentes ondas portadoras de diferente nombre y tipo de modulación. Todas estas frecuencias son pertenecientes a la Banda L inferior o superior, que son las franjas del espectro electromagnético asignadas para el ARNS. Si en algo coinciden todos los sistemas es en la emisión de señales en la frecuencia 1176,45 MHz. Como se observa en la Figura 4.4, esta frecuencia pertenece a la Banda L inferior y concretamente, los 1176,45 MHz son denominados como L5 (GPS y QZSS), B2a (BeiDou), E5a (Galileo) y la futura L5OC (GLONASS). Aunque no aparece en la figura, en el caso de IRNSS también se le denomina L5. La emisión conjunta en esta frecuencia permitirá en el futuro una mejor interoperabilidad entre los diferentes sistemas.

Cada una de estas portadoras, será la encargada de transportar los diferentes parámetros incluidos en el mensaje de navegación. Por otro lado, los segmentos espacial, tierra y usuario de cada uno de los sistemas GNSS tendrán diferentes peculiaridades. Además, cada sistema GNSS ofrecerá diferentes servicios y rendimientos.

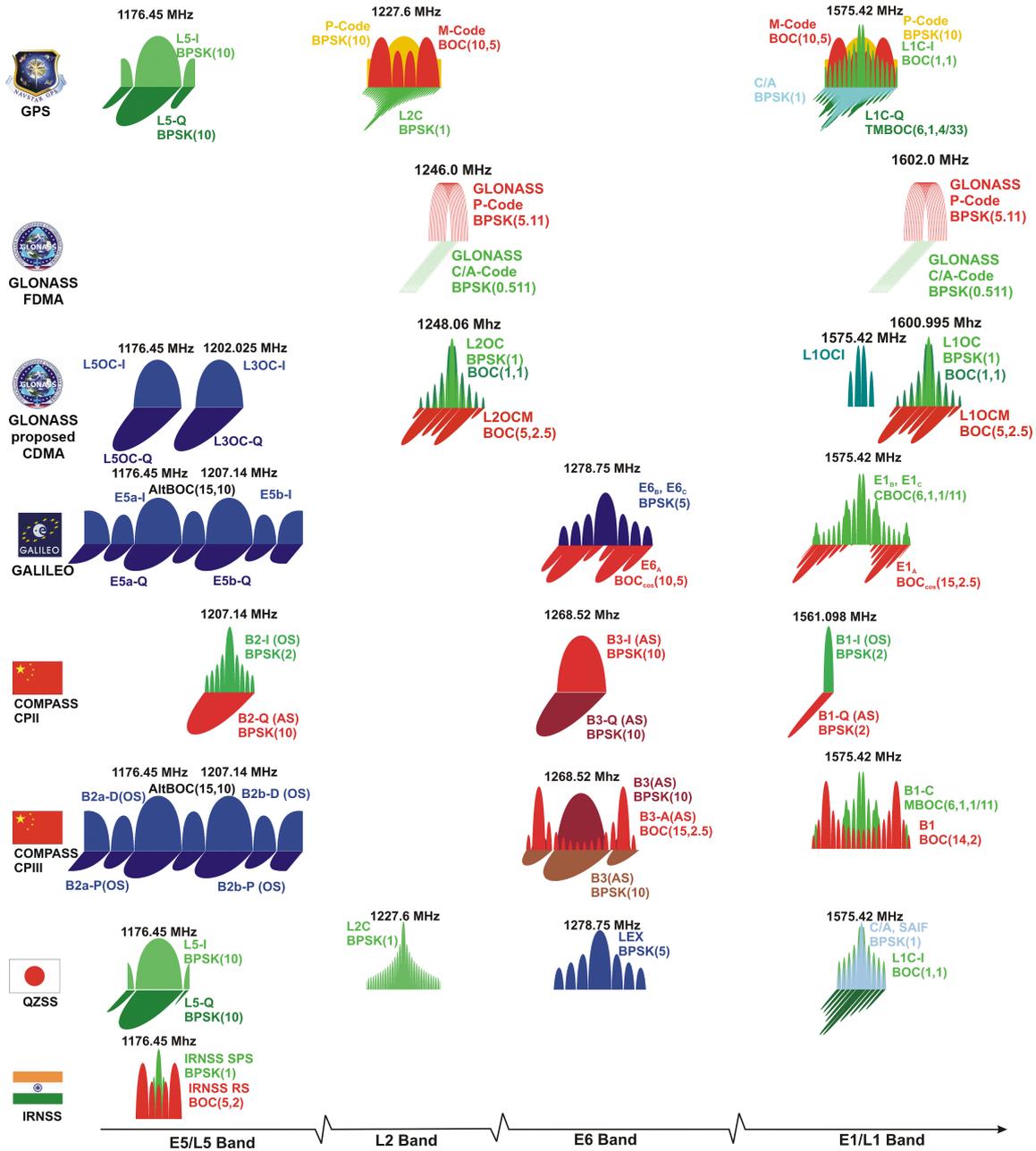


Figura 4.4: Bandas de frecuencia de los sistemas GNSS [16].

4.2.1. Galileo

Galileo es el sistema GNSS que ha desarrollado la Unión Europea bajo un programa de fines y supervisión civiles y que proporciona un servicio de posicionamiento global altamente preciso. Su funcionamiento es compatible e interoperable con GPS y GLONASS.

Ya en la década de 1990, la Unión Europea vio la necesidad de poseer un sistema global de navegación por satélite propio. En aquel momento ya se hacían otros esfuerzos en la rama aeroespacial, como el lanzador Ariane y la aeronáutica Airbus. Por ello, la Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea unieron fuerzas para construir Galileo, un sistema GNSS europeo independiente, bajo control civil [82].

El programa Galileo se estructuró de acuerdo a tres fases principales [36]:

- **Validación en órbita (*In-Orbit Validation (IOV)*):** esta primera fase, que incluye la definición, el desarrollo y la validación en órbita del programa fue llevada a cabo por la Agencia Espacial Europea (*European Space Agency (ESA)*) y la Unión Europea.

Previo al lanzamiento de ningún satélite que fuese a formar parte de la constelación de Galileo, se lanzaron dos satélites como elemento de validación en órbita de Galileo o GIOVE. Estos fueron el GIOVE-A y el GIOVE-B.

GIOVE-A se lanzó en diciembre de 2005 y sus dos objetivos principales eran testear los dos relojes de rubidio de a bordo y reclamar a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) las frecuencias asignadas a Galileo. Se lanzó a una órbita terrestre media (MEO) y aunque fue diseñado y dimensionado para una misión de 27 meses, sigue operativo. No obstante, se retiró oficialmente del servicio en junio de 2012. En ese tiempo, recopiló datos sobre el entorno de la órbita de Galileo, ayudando en el diseño de la constelación completa.

GIOVE-B se lanzó en abril de 2008 con el objetivo de que su carga de pago transmitiese señales que pudieran ser testeadas desde diferentes centros de control. Después de más de cuatro años, en julio de 2012 se retiró oficialmente del servicio.

- **Capacidad operativa inicial (*Initial Operational Capability (IOC)*):** aun con el propósito de hacer validaciones en órbita (IOV), los dos primeros satélites operativos de Galileo, GSAT0101 y GSAT0102, se lanzaban en octubre de 2011. El segundo par, GSAT0103 y GSAT0104, se lanzó en octubre de 2012.

Las características de estos satélites son las que aparecen en la Tabla 4.1.

Satélites IOC	
Masa	~ 700 kg
Tamaño con las alas solares plegadas	3,02 x 1,58 x 1,59 m
Tamaño con las alas solares desplegadas	2,74 x 14,5 x 1,59 m
Esperanza de vida	más de 12 años
Potencia	1420 W (con luz solar) 1355 W (en eclipse)
Altitud de la órbita	23222 km
Inclinación de la órbita	56°

Tabla 4.1: Características de los primeros satélites operativos de la constelación Galileo.

Una vez la fase de validación en órbita había sido completada, se pasaba a la fase Full Operational Capability (FOC).

- **Capacidad operativa final (*Full Operational Capability (FOC)*):** esta fase fue totalmente financiada por la Unión Europea y gestionada por la Comisión Europea. La ESA actúa como agente de diseño y adquisiciones en nombre de la Comisión.

Los primeros dos satélites de esta fase, GSAT0201 y GSAT0202, se lanzaron en agosto de 2014, y a pesar de haberlos inyectado en una órbita incorrecta, se pudieron mover a una mejor órbita. No obstante, estos satélites no son utilizables [83].

A partir de marzo de 2015 y hasta diciembre de 2021, un total de 22 satélites adicionales fueron lanzados (GSAT0203 - GSAT0224). Todos los satélites de esta fase presentan las

características de la Tabla 4.2, en la que se observa mejoras en la potencia de emisión de la señal, con respecto a los satélites de la fase IOC.

La constelación cuenta a fecha de verano del 2023 con un total de 28 satélites, de los cuales son 22 los que se encuentran completamente operativos y disponibles. De los otros seis, hay cuatro que no estarán operativos hasta nuevo aviso, de los que solo en un caso se indica que se trata de una inoperatividad por razones de gestión de la constelación. Los otros dos son los dos satélites inyectados en órbita errónea (GSAT0201 y GSAT0202) [83].

Satélites FOC	
Masa	~ 733 kg
Tamaño con las alas solares plegadas	2,91 x 1,7 x 1,4 m
Tamaño con las alas solares desplegadas	2,5 x 14,67 x 1,1 m
Esperanza de vida	más de 12 años
Potencia	1900 W
Altitud de la órbita	23222 km
Inclinación de la órbita	56°

Tabla 4.2: Características de los satélites de la última fase de lanzamiento de la constelación Galileo

La intención es que al completar la constelación, esta comprenda un total de 30 satélites distribuidos uniformemente alrededor de tres planos orbitales inclinados 56° . El período orbital de los satélites será de 14 h.

Se pretende que desde cualquier localización sean visibles de seis a ocho satélites, que ofreciendo frecuencias duales, permitirán cálculos de tiempo y posición que lleguen a la precisión centimétrica.

Al inicio de esta sección ya se comentaba que Galileo es un sistema civil, siendo la única de todas las constelaciones GNSS en serlo. Esto es una gran ventaja, pues hoy en día los sistemas de posicionamiento son indispensables para los negocios, la banca, el transporte, la aviación, la comunicación, etc. Gracias a su naturaleza de sistema civil, sus servicios nunca se van a ver afectados por intereses militares.

La combinación de señales de Galileo y GPS (interoperabilidad) en receptores duales reporta mayor nivel de precisión que el disponible actualmente solo con GPS. Es decir, el uso de un mayor número de satélites garantizará la disponibilidad, mejorándola en entornos como las grandes ciudades con edificios muy altos, donde las señales de los satélites que están bajos en el horizonte puedan ser obstruidas. El mayor número de satélites seguirá garantizando la disponibilidad.

4.2.1.1. Señal

Los satélites Galileo transmiten constantemente tres señales CDMA diferentes con polarización circular a derechas. Estas señales se denominan por los nombres E1, E5 (subdividiéndose en E5a y E5b) y E6 y se transmiten en cuatro bandas de frecuencia que proporcionan un amplio ancho de banda para la transmisión de las señales de Galileo, como se ve en la Figura 4.5. En la Tabla 4.3 se especifican las frecuencias de cada una de las señales, así como los códigos que

se modulan sobre estas y las frecuencias de los mismos. Ninguno de los códigos se encripta, a excepción del código C_{E6-B} , tal y como se especifica.

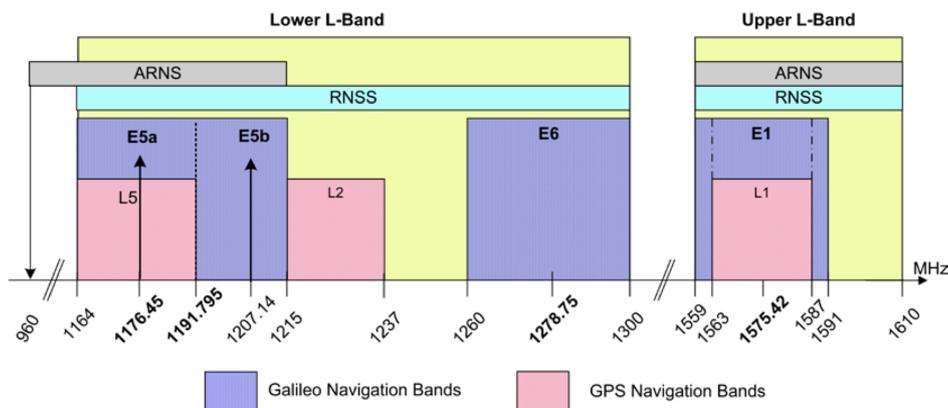


Figura 4.5: Frecuencias de transmisión de Galileo y GPS [17].

Señal		Frecuencia de la portadora (MHz)		Frecuencia del código (MHz)	Códigos
E1		1575,42		1,023	C_{E1-B} C_{E1-C}
E6		1278,75		5,115	C_{E6-B} (encriptado) C_{E6-C}
E5	E5a	1191,795	1176,45	10,23	C_{E5a-I}
	E5b		1207,14		C_{E5a-Q}
					C_{E5b-I}
					C_{E5b-Q}

Tabla 4.3: Señales de Galileo [16].

Por lo que respecta al mensaje de navegación, los satélites de Galileo emiten diferentes datos en cuatro tipos de mensajes de navegación: el mensaje de navegación F/NAV, el mensaje de navegación I/NAV, el mensaje de navegación comercial (C/NAV) y el mensaje de navegación gubernamental (G/NAV). De todos ellos, el mensaje de navegación G/NAV no pertenece al dominio público y el C/NAV aún no está definido [84].

Todos estos mensajes de navegación se dividen en una secuencia de *frames* de forma que un *frame* se compone de varios *sub-frames* y este a su vez se compone de varias páginas. Por tanto, la página es la mínima unidad para construir el mensaje de navegación.

Los *frames*, *sub-frames* y páginas tienen diferente duración según se trate de un mensaje F/NAV o I/NAV. Las páginas son las que contienen el patrón de sincronización, que es de 10 bits en el caso de los mensajes I/NAV y de 12 bits en los mensajes F/NAV. Además, el contenido de las páginas tiene establecido diferentes formatos en función del tipo de mensaje que se emite. En estas páginas se incluyen unos bits dedicados a la identificación de las mismas, pues entre todas ellas se hará llegar al receptor los diferentes parámetros de efemérides, sistema temporal, correcciones del reloj, correcciones ionosféricas, estado de salud de los satélites y otros parámetros de servicio.

4.2.1.2. Arquitectura

El sistema Galileo no solo se compone de los satélites. Para asegurar el correcto funcionamiento de estos a través de la monitorización, se despliega toda una infraestructura en tierra. De este modo, el sistema Galileo se puede dividir en:

- **Segmento espacial:** formado por los satélites, cuya principal función consiste en almacenar y retransmitir el mensaje de navegación enviado por el segmento tierra (GS). Esta retransmisión se hace de forma conjunta con el código que generan a bordo, modulando ambos sobre la portadora, también de generación a bordo.

Cuando Galileo esté completamente operacional, serán 30 los satélites MEO que conformarán la constelación, repartida en 3 planos orbitales inclinados a 56° . Estos satélites serán de las características mostradas en la Tabla 4.2, menos los cuatro de la fase inicial, que tienen las características de la Tabla 4.1.

En estos satélites se instalan relojes atómicos de alta precisión, aunque ya se ha visto anteriormente que se requerirán correcciones.

- **Segmento tierra:** a su vez se subdivide en un segmento de control (*Galileo Control Segment (GCS)*) y otro de misión (*Galileo Mission Segment (GMS)*). Ambos subsegmentos interactúan con los satélites a través de una red mundial de estaciones terrestres encargadas de control y monitorización, repartidos, tal y como muestra la Figura 4.6, alrededor del mundo.

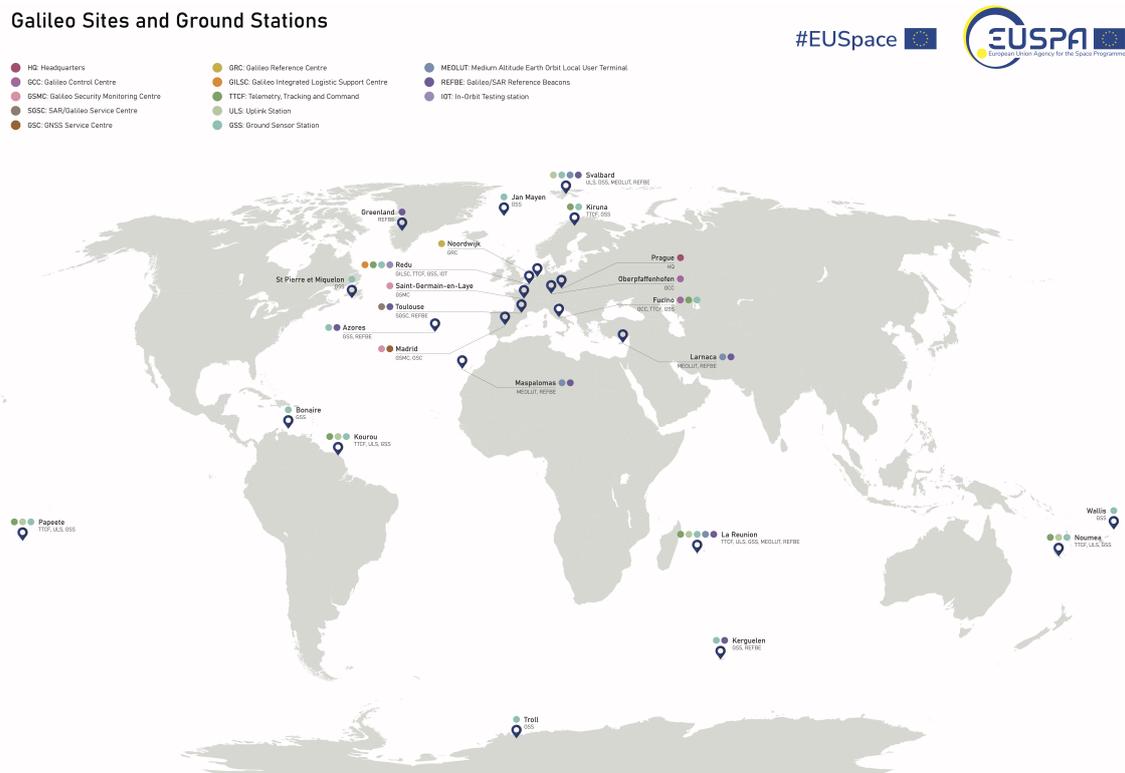


Figura 4.6: Estaciones terrestres de Galileo [18].

El Segmento de Control de Galileo (GCS) cuenta con dos centros de control (*Galileo Control Centre* (GCC)) en Alemania e Italia, que son sus principales instalaciones. La principal función de este segmento consiste en el control y monitorización de los satélites y su carga de pago y la planificación y automatización de funciones que aseguren operaciones seguras. Esto se consigue principalmente a través de estaciones de Telemetría, Seguimiento y Comando (TTCF), pero también utilizando datos de otras estaciones de la extensa red mostrada en la Figura 4.6 [85].

Por su parte, el Segmento de Misión de Galileo (GMS) es responsable de la transmisión de los datos necesarios para los mensajes de navegación. Se compone de ciertas instalaciones en los GCC y una red de estaciones de enlace ascendente (*Uplink Station* (ULS)) y de estaciones con sensores (*Ground Sensor Station* (GSS)), repartidas como se ve en la Figura 4.6.

- **Segmento usuario:** compuesto por los receptores de Galileo, que serán los que calculen las pseudodistancias y resuelvan las ecuaciones necesarias para poder obtener su posición.

4.2.1.3. Servicios

Una vez el sistema Galileo esté completamente operacional, este será capaz de ofrecer seis servicios:

- **Servicio abierto (*Open Service* (OS)):** se trata de un servicio gratuito y abierto que Galileo ofrece para que cualquier usuario pueda aprovecharse de sus servicios de posicionamiento. En el futuro, este servicio estará integrado con el siguiente (OSNMA).
- **Autenticación de mensajes de navegación de servicio abierto (*Open Service Navigation Message Authentication* (OSNMA)):** servicio que entrega datos autenticados, haciendo que los usuarios puedan ser conocedores de que el mensaje de navegación es en efecto procedente de Galileo y no ha sido modificado.
- **Servicio de alta precisión (*High Accuracy Service* (HAS)):** este servicio complementa el servicio abierto, aportando otra señal de navegación adicional, que consigue mejorar la precisión y los servicios prestados. Esta señal puede ser cifrada.
- **Servicio de autenticación comercial (*Commercial Authentication Service* (CAS)):** otro servicio complementario al abierto de acceso controlado y solo para usuarios concretos.
- **Servicio público regulado (*Public Regulated Service* (PRS)):** este servicio está restringido a usuarios que hayan sido previamente autorizados por los gobiernos participantes en el programa Galileo. Ofrece un alto nivel de continuidad del servicio.
- **Servicio de búsqueda y rescate (*Search and Rescue service* (SAR)):** este servicio no es más que la participación europea en un programa internacional que pretende el diseño de un sistema global de búsqueda y rescate: COSPAS-SARSAT. Basándose en satélites, este sistema pretende poder recibir avisos de socorro de cualquier parte del globo.

En la Tabla 4.4 se pueden ver los valores de los diferentes parámetros conseguidos con cada uno de los servicios.

		OS		HAS	PSR
		Frecuencia simple	Frecuencia dual		Frecuencia dual
Precisión (95 %)	Horizontal	15 m	4 m	<20 cm	6,5 m
	Vertical	35 m	8 m	<40 cm	12 m
Disponibilidad		99,5 %		99 %	99,5 %
Integridad		No			

Tabla 4.4: Precisión, disponibilidad e integridad de los diferentes servicios de Galileo [30, 31, 32].

4.2.2. GPS

GPS es el sistema GNSS de los Estados Unidos y fue el primero de todos. Inició su desarrollo en 1973 a manos del ejército estadounidense, pues era un sistema inicialmente concebido para fines militares.

En 1983, el vuelo 007 de Korean Air Lines, que cruzaba el Pacífico de Estados Unidos a Corea del Sur, tuvo un fallo en sus sistemas de navegación que le hizo invadir el espacio aéreo de la entonces URSS en dos ocasiones. La URSS, incapaz de identificar esta aeronave, creyó conveniente derribarla. Tras este accidente, Estados Unidos decidió hacer del GPS un sistema de uso civil, que permitiese mejorar la precisión en navegación, especialmente sobre océanos y zonas remotas. Se reservaba, no obstante, ciertas capacidades para uso exclusivo militar.

Sin embargo, no fue hasta 1993, con 24 satélites operacionales en órbita, cuando se declaró la capacidad operacional inicial del sistema. En 1995, finalmente se consideró que el sistema tenía plenas capacidades operativas.

4.2.2.1. Señal

Cuando inició el programa de satélites GPS, este emitía dos señales circulares polarizadas a derechas en dos frecuencias designadas L1 y L2. La L1 se emite a 1575,42 MHz y no tarda en convertirse en la principal señal del GPS, pues sobre ella se modula el código Coarse/Acquisition C/A de uso civil y el código Precision/Secure P(Y), que está encriptado y se reserva para uso militar. Por su parte, en la señal L2, emitida a 1227,6 MHz solo se modula el código (P/Y), por lo que es una frecuencia de uso exclusivo militar que se estableció para tener dos medidas de frecuencia que pudiesen mejorar la corrección del retraso ionosférico.

En 2005 inicia un programa de modernización del GPS con el lanzamiento de nuevos satélites (IIR-M) que también emitirían dos nuevos códigos. Se iniciaba así la modulación del código L2C de uso civil sobre la frecuencia L2. También se creaba otro nuevo código, el M (militar), que se modulaba sobre la L1 y la L2 para mejorar la resistencia a la interferencia del código Y.

En 2010, en una nueva etapa de modernización, se inicia el lanzamiento de los satélites IIF, que además de todo lo anterior, también incluían la emisión de una señal a 1176,45 MHz, un nuevo radioenlace para uso y fines civiles. Esta señal, sobre la que se modulan los códigos I y Q, es denominada por L5 y se diseñó para que fuese compatible con otros GNSS, de modo que se mejoraba la interoperabilidad.

Con la última evolución de los satélites, los llamados GPS III/IIIF se inicia la emisión del que es el cuarto código civil, que se modula sobre L1, con el nombre L1C. Este nuevo código tiene la finalidad de permitir la interoperabilidad del sistema GPS con el resto de GNSS.

En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de las diferentes señales y códigos emitidos. Se ve que el código L2C se divide en L2 CM y L2 CL, que se refieren a código medio y código largo.

Señal	Frecuencia de la portadora (MHz)	Frecuencia del código (MHz)	Códigos
L1	1575,42	1,023	C/A
			L1C
		10,23	P(Y)
		5,115	M
L2	1227,6	0,5115	L2C
			CM
			CL
		10,23	P(Y)
		5,115	M
L5	1176,45	10,23	I
			Q

Tabla 4.5: Señales de GPS [33].

Respecto a los mensajes de navegación, GPS emite un total de cinco tipos de mensajes de navegación: L1 C/A, L2-CNAV, CNAV-2, L5-CNAV y MNAV. Todos ellos menos el MNAV son de ámbito civil.

El mensaje de navegación L1 C/A tiene una estructura similar a los de Galileo, dividiéndose en una secuencia de *frames*, que se subdividen en *sub-frames*. Los *sub-frames*, a su vez, se subdividen en lo que se llaman palabras (en Galileo se les denomina páginas). CNAV-2, por su parte solo se divide en *frames* y *sub-frames*.

En cambio, los mensajes L2-CNAV, L5-CNAV y MNAV, que son similares entre sí, comparten una estructura con un nuevo formato que les permite mayor flexibilidad y control. En este caso, el mensaje de navegación se compone solamente de una secuencia de mensajes en la que se encontraran todos los parámetros necesarios para que el receptor pueda calcular su posición [86].

4.2.2.2. Arquitectura

La arquitectura GPS, al igual que la de Galileo y que la de cualquier otro sistema GNSS se compone de tres segmentos:

- **Segmento espacial:** formado por un total de 31 satélites de diferentes capacidades (ver Tabla 4.6), con los que se consigue que el 95 % del tiempo haya al menos 24 operativos.

Modelo	Años de lanzamiento	N°satélites operativos	Señales y códigos transmitidos				
IIR	1997-2004	6	L1	C/A		P(Y)	
			L2	P(Y)			
IIR-M	2005-2009	7	L1	C/A	P(Y)	M	
			L2	L2 CM	L2 CL	P(Y)	M
IIR-M	2010-2016	12	L1	C/A	P(Y)	M	
			L2	L2 CM	L2 CL	P(Y)	M
			L5	I		Q	
III/IIIF	2018 - actualidad	6	L1	C/A	L1C	P(Y)	M
			L2	L2 CM	L2 CL	P(Y)	M
			L5	I		Q	

Tabla 4.6: Satélites GPS [34].

Como se muestra en la Tabla 4.6, solo hay un total de 18 satélites que transmitan la señal L5: los pertenecientes al bloque IIR-M y al III/IIIF. Esto representa poco más de la mitad de todos los satélites, el 58%. A medida que se vayan lanzando los nuevos satélites y retirando los anteriores, este porcentaje mejorará.

Además, la tabla no incluye otros modelos de satélite, anteriormente operativos, como los del bloque IIA. De este bloque, el último satélite fue retirado de su función en 2019, habiendo logrado duplicar su vida útil esperada (siete años y medio).

Todos los satélites se encuentran en una órbita MEO inclinada 55° , a 20.180 km sobre la superficie terrestre. Se reparten en seis planos orbitales equiespaciados de forma que se asegura que, *a priori*, desde cualquier parte del planeta podrán verse al menos cuatro satélites.

Al igual que los satélites de Galileo, los relojes de a bordo de los satélites son relojes atómicos de alta precisión.

- **Segmento tierra:** en el caso del sistema GPS, a este segmento se le llama segmento de control o *Control Segment* (CS). Se trata de una red de infraestructuras terrestres que monitorizan y controlan los satélites, a la vez que envían comandos y datos a la constelación.

Los diversos componentes que se ven en la Figura 4.7, se pueden agrupar en tres grupos:

- Estaciones maestras de control: utiliza los datos recompilados de las estaciones de monitorización para calcular la posición de los satélites y enviarles a estos los mensajes de navegación. También se encargan del mantenimiento y la revisión del estado de salud de los satélites.

Hay dos estaciones maestras, la principal y una alternativa, para el caso de que en la primera haya fallos.

- Estaciones de monitorización: siguen a los satélites cuando sobrevuelan, recopilando los mensajes de navegación, mediciones temporales por sincronización de código o portadora y datos atmosféricos. Transmiten los datos a las estaciones maestras.

Hay un total de 16 estaciones de monitorización, seis de las cuales son controladas por la *Air Force* estadounidense y las otras diez por la agencia nacional de inteligencia geoespacial (NGA).

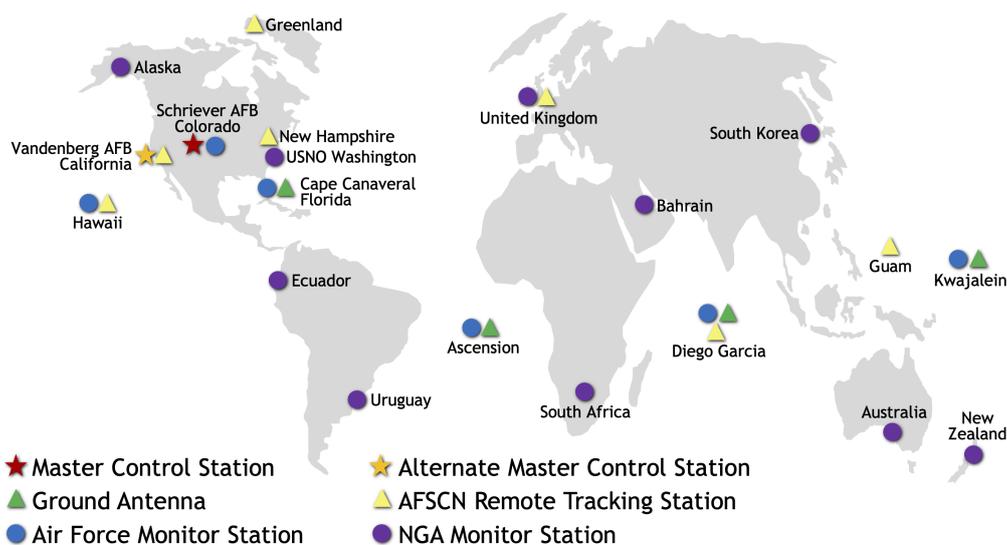


Figura 4.7: Estaciones terrestres de GPS [19].

- **Antenas:** encargadas de enviar los datos, comandos y mensajes de navegación a los satélites. También recopilan la telemetría.

Se trata de una red de cuatro antenas dedicadas al sistema GPS y siete antenas de la *Air Force* pertenecientes a la red *Air Force Satellite Control Network* (AFSCN).

- **Segmento usuario:** se compone de todos los receptores GPS civiles o militares. A diferencia de Galileo, según la Oficina Nacional de Coordinación para el posicionamiento, la navegación y la sincronización basados en el espacio, *el sistema GPS juega un papel crítico para la seguridad nacional de los Estados Unidos*. Es decir, tiene aplicaciones militares importantes en papel de defensa [87].

Como se puede ver, en todos los segmentos del GPS, el ejército tiene recursos de uso exclusivo, que pueden ser o no compartidos con la población civil. Es decir, las diferentes antenas o estaciones de monitorización de la red militar sí son utilizadas para fines civiles, pero, en cambio, los satélites emiten señales codificadas que solo receptores militares pueden decodificar.

4.2.2.3. Servicios

El sistema GPS tan solo proporciona dos servicios de posicionamiento:

- **Standard Positioning Service (SPS) o servicio de posicionamiento estándar:** hace uso de los códigos y mensajes de navegación habilitados para uso civil. Estos son L1 C/A, L1 L1C, L2 L2C, L5I y L5Q.

En un primer momento, la precisión de este servicio era muy baja debido al uso de la disponibilidad selectiva (*Selective Availability* (S/A)). La S/A consistía en la aplicación voluntaria de una degradación de la precisión sobre el servicio civil SPS. El día que la S/A se desactivó (2 de mayo del 2000), se pasó de tener una precisión de más de 45 m a una de 6,3 m. En la Figura 4.8 se observa como cambió el nivel de incertidumbre.

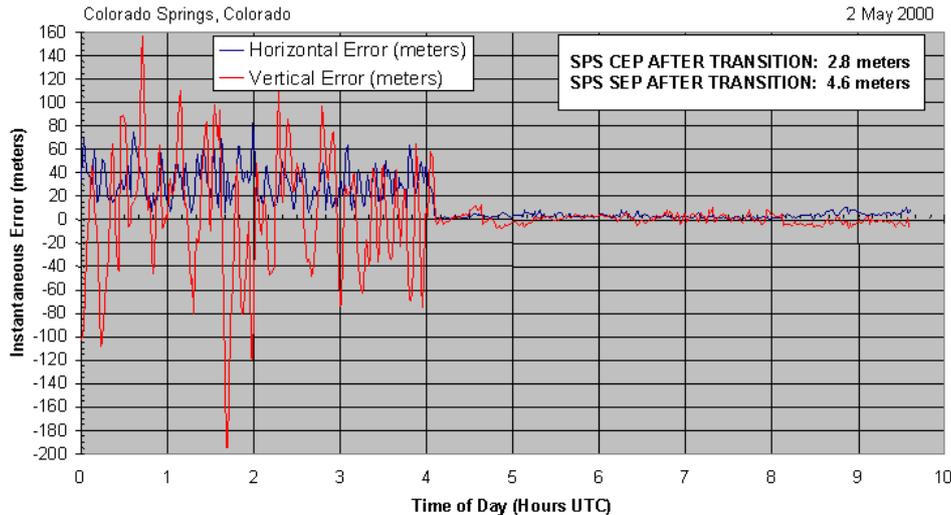


Figura 4.8: Mejora de la precisión tras la desactivación de la S/A [20].

- Precise Positioning Service (PPS) o Servicio de posicionamiento preciso:** hace uso de los códigos militares P(Y) y M de las frecuencias L1 y L2. Estos códigos, junto con mensajes de navegación, se encriptan y se modulan sobre las portadoras anteriormente mencionadas. De este modo, tan solo el servicio militar tiene acceso a la mejor precisión que el sistema es capaz de ofrecer.

En la Tabla 4.7 se pueden ver los valores de precisión, integridad y disponibilidad que la constelación GPS ofrece para cada uno de sus servicios.

		SPS	PPS
Precisión (95 %)	Horizontal	< 8 m	< 13 m
	Vertical	< 13 m	< 22 m
Disponibilidad de al menos 21 satélites		>98 %	>98 %
Integridad		No	< 10^{-5} /hora

Tabla 4.7: Precisión, disponibilidad e integridad de los diferentes servicios de GPS [35].

4.2.3. GLONASS y BeiDou

GLONASS y BeiDou son sistemas GNSS muy similares entre sí. Ambos sistemas son de origen militar y surgieron como respuesta al desarrollo del GPS, lo que hace que GLONASS y BeiDou también sean similares en características y capacidades al sistema estadounidense. Tras el inicio del desarrollo de GPS, la Unión Soviética en 1976 también dio comienzo a los trabajos de desarrollo de GLONASS. BeiDou, por su parte, fue un poco más tardío, iniciando su desarrollo en los ochenta.

Por lo que respecta a la señal, GLONASS presenta diferencias importantes respecto al resto de sistemas, pues este se sustentaba al completo sobre técnicas de acceso múltiple por división de frecuencia (*Frequency Division Multiple Access (FDMA)*) y no utilizaba CDMA. Otra diferencia importante son las frecuencias sobre las que GLONASS emite, las cuales no incluyen la

frecuencia 1176,45 MHz (equivalente a E5a de Galileo, L5 de GPS y B2a de BeiDou). Tampoco emite señales en la frecuencia 1207,14 MHz (E5b de Galileo y B2b de BeiDou). Todo esto está en proceso de mejora a través del lanzamiento de nuevos satélites que sí emiten las anteriores señales, denominadas para GLONASS L5 y L3 respectivamente. Además, estos nuevos satélites también implementan técnicas CDMA [88].

Por tanto, GLONASS emite en 1600,995 MHz (L1), 1248,06 MHz (L2) y 1202,025 MHz (L3) y BeiDou emite en 1561,098 MHz (B1), 1575,42 MHz (B1C), 1268,520 MHz (B3), 1207,14 MHz (B2b) y 1176,45 MHz (B2a) [37, 89].

Ambos sistemas presentan una arquitectura compuesta por los mismos tres segmentos que componen la de Galileo o GPS. El segmento usuario y el tierra son muy similares a los sistemas anteriormente tratados. Por ello, pasa a tratarse el segmento espacial.

Existen diferencias entre BeiDou y el resto de sistemas en el segmento espacial. BeiDou fue inicialmente una constelación que tenía el objetivo de dar cobertura a China. Por tanto, en un primer momento, lo que ahora se conoce como BeiDou-1, se componía de un total de tres satélites GEO que daban cobertura a China.

Evoluciones futuras hicieron que se ampliase la cobertura a toda el área de Asia y el Pacífico, con la fase del proyecto que se denominó BeiDou-2, en la que se lanzaron cinco satélites GEO, cinco satélites de órbita geosíncrona (IGSO) y tres MEO [90].

El despliegue de la última etapa, denominada BeiDou-3, finalizó en 2020 tras el lanzamiento de treinta nuevos satélites MEO. Durante este proceso se retiraron varios satélites, quedando operativos solo los mostrados en la Tabla 4.8.

Por su parte, GLONASS, al igual que el resto de sistemas tratados, solo cuenta con satélites MEO. Concretamente, se trata de un total de 24 satélites distribuidos en un total de 3 planos orbitales.

En la Tabla 4.8 aparece un resumen de todos los satélites y características de las distintas constelaciones.

	Galileo	GPS	GLONASS	BeiDou		
Órbita	MEO	MEO	MEO	GEO	IGSO	MEO
Número de satélites	30	31	24	7	10	27
Planos orbitales	3	6	3	-	3	3
Inclinación de las órbitas	56°	55°	64,8°	-	55°	55°
Altitud de las órbitas (km)	23.222	20.180	19.100	35.786	35.786	21.528

Tabla 4.8: Comparativa del segmento espacio de las diferentes constelaciones [36, 34, 37, 38, 39].

Por lo que respecta a los servicios ofrecidos por cada sistema se pueden clasificar en:

- **GLONASS:** presta unos servicios muy similares a los del GPS, que se subdividen en:

- Servicio de precisión estándar (*Standard Precision Service* (SP)): emitido en todas las frecuencias en las que emite el sistema (L1, L2 y L3).
- Servicio de alta precisión (*High Precision Service* (HP)): emitido en cuadratura de fase con las señales del servicio SP en las mismas frecuencias, pero con mayor ancho de banda.

Es conocido por la comunidad científica que también se emite un equivalente al código P del GPS para los servicios de alta precisión. No obstante, las autoridades responsables de este sistema nunca han reconocido su existencia [40].

- **BeiDou**: En este caso debido al despliegue realizado, sus servicios se dividen en globales y regionales. Por comparativa con el resto de sistemas globales, solo se comentarán los servicios globales que BeiDou ofrece, que no son más que un servicio abierto (OS) y un servicio autorizado

Se comprueba que tanto GLONASS como BeiDou ofrecen algunos servicios a los que solo tienen acceso usuarios autorizados debido a su origen y carácter militar. El rendimiento de los servicios destinados a uso civil aparece reflejado en la Tabla 4.9.

		GLONASS	BeiDou OS
Precisión (95 %)	Horizontal	4 ~ 7 m	≤ 2 m
	Vertical	10 ~ 15 m	≤ 2 m
Disponibilidad		$\geq 0,99$	$\geq 0,998$
Integridad		No	

Tabla 4.9: Precisión, disponibilidad e integridad de GLONASS y BeiDou [40, 41].

4.3. Ventajas y limitaciones

Los primeros procedimientos en los que se utilizaban los sistemas GNSS llegaron en 1993, tratándose estos de operaciones en ruta (nacional y oceánica), terminal y de aproximación de no precisión (NPA). Aunque con restricciones operativas, estos primeros procedimientos ya ofrecieron beneficios significativos a los operadores de aeronaves [91].

El uso de sistemas GNSS para navegación reporta numerosas ventajas. A pesar de que se considere una ayuda a la navegación (NAVAID) más, no es así, en tanto en cuanto este sistema es de alcance global y permite ser utilizado en todas las fases del vuelo. Los NAVAIIDs terrestres, en cambio, son de alcance de área y solo se podrán usar para una determinada fase del vuelo.

En la actualidad, GNSS proporciona una guía precisa en áreas remotas y oceánicas, donde es poco práctico, demasiado costoso o imposible proporcionar una guía tradicional, confiable y precisa de NAVAIID. Actualmente, el *modus operandi* de muchas naciones consiste en el uso de GNSS para mejorar el servicio ofrecido a los operadores, a la vez que se evitan nuevas inversiones en el despliegue de NAVAIIDs tradicionales.

Además, con el objetivo de mejorar la eficiencia de las rutas de vuelo, incluso en áreas dotadas de un buen servicio de NAVAIIDs tradicionales, también se utilizan los sistemas GNSS. La oferta de estas rutas eficientes, sin gasto adicional alguno para las naciones, permite que

estas puedan diseñar un espacio aéreo en ruta y terminal con máxima capacidad y mínimos retrasos.

En aeropuertos, aparte de apoyar operaciones de rodadura, el GNSS ofrece una guía precisa de salida que permite la realización de procedimientos eficientes acústicamente (se reduce el ruido). Además, en aproximación, permite mínimos más bajos, sin la necesidad de instalar un NAVAID en el aeropuerto. Como se veía en la Sección 3.3.1.3, el GNSS apoya los procedimientos de aproximación con guía vertical (APV) en cualquier pista, tomando en cuenta los diferentes estándares que cada aeródromo pueda tener. El uso de GNSS hace que ciertas acciones, como el desplazamiento de un umbral de aterrizaje por cualquier motivo, no implique ningún gran contratiempo, pues es un sistema flexible y permitirá inmediatamente habilitar nuevas operaciones con orientación vertical hasta el nuevo umbral.

A bordo de las aeronaves, la recepción de la señal GNSS permite que estas conozcan de forma precisa su posición, velocidad y tiempo, información que, con el equipamiento adecuado, se puede utilizar para soportar funciones adicionales como la vigilancia automática dependiente (ADS) y las comunicaciones de enlace de datos controlador-piloto (CPDLC).

Además, el GNSS puede implementarse por etapas, de modo que cada etapa reporta mayores beneficios que la anterior. Esto hace que los operadores puedan plantearse cuándo equipar las aeronaves con aviónica GNSS haciendo balance coste-beneficios.

La extensión en el uso de los sistemas GNSS permitirá que los NAVAIDs tradicionales puedan ir retirándose gradualmente hasta llegar o no a desaparecer. Esto reducirá los costos a medio y largo plazo, pues ya en las primeras etapas de la implementación del GNSS, se pueden evitar los costes de reemplazo de los NAVAIDs tradicionales existentes.

No obstante, antes de retirar por completo los antiguos NAVAIDs, se deben tener en cuenta las limitaciones de estos nuevos sistemas de navegación, pues una transición al GNSS representa un cambio importante para operadores, pilotos, servicios de tráfico aéreo (ATS) y personal regulador.

Un desafío para los sistemas GNSS es el logro de una alta disponibilidad, además de poder proporcionar integridad. En un primer momento, cuando aún no había visión de suficientes satélites (suficiente disponibilidad), los primeros procedimientos GNSS se basaron en los NAVAIDs tradicionales como respaldo. Hoy, con el fin de poder llegar a prescindir del VOR y DME, se requiere, además, de integridad, la cual no ofrecen las constelaciones GNSS, por lo que se han desarrollado las denominadas aumentaciones (SBAS, GBAS y ABAS). Estas serán tratadas en mayor profundidad en la Sección 4.4.

De otra parte, la continuidad de los servicios Global Navigation Satellite System (GNSS) se ve afectada por las interferencias en su señal, mientras que por contra, el volumen de servicio reducido de los NAVAIDs tradicionales hace que sea más complicado interferir su señal, aunque sí es posible. De cualquier forma, una interferencia en la señal GNSS afectaría a muchas más aeronaves de las que puede afectar una interferencia en la señal de un VOR o un DME. Los efectos que puedan causar estas interferencias (intencionadas o no) deberán ser analizados, y en su caso, se deberán implementar medidas para mitigarlos.

A pesar de que el GNSS pueda soportar aproximaciones con guiado vertical a cualquier pista con un coste relativamente bajo, los mínimos no solo dependerán de las capacidades del sistema, sino que también estarán relacionados con las características topográficas y físicas del

aeródromo, así como de cierta infraestructura, como la iluminación. Por tanto, al realizar una transición hacia este tipo de sistemas, se deberá tener en cuenta el coste que supondrá planificar nuevas aproximaciones basadas en GNSS y con mínimos más bajos, teniendo que cumplir con la normativa de cada aeródromo.

Otra limitación que presentan estos sistemas es que su seguridad depende de la precisión de las bases de datos de navegación. Por ello, serán necesarios procedimientos y sistemas que garanticen la integridad de los datos para el desarrollo de nuevos procedimientos y para su uso en la aviónica de las aeronaves.

Por último, se tiene que tener en cuenta que el carácter global de los sistemas GNSS hace que los diferentes territorios y naciones dispuestos a dar el paso hacia la transición deban coordinarse entre sí.

4.4. Aumentaciones

En la Sección 3.2 se definían los cuatro requisitos que la PBN exige de sus sistemas. En cambio, en la Sección 4.2 se ha podido comprobar como ninguno de los sistemas GNSS actuales ofrecen integridad para su servicio civil. Además, en la Sección 4.3 también se comentaban las restricciones que los sistemas GNSS tienen para proporcionar suficiente disponibilidad y continuidad.

En cambio, por lo que respecta a la precisión, según lo mostrado en la Tabla 4.10, de los sistemas GNSS analizados, GPS, Galileo y BeiDou podrían satisfacer los requisitos.

Operación	Precisión horizontal (95 %)	Precisión vertical (95 %)	Integridad	Tiempo de alerta	Continuidad	Disponibilidad
En ruta	3,7 km	N/A	$1 - 1 \cdot 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \cdot 10^{-4}$ a $1 - 1 \cdot 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
En ruta Terminal	740 m	N/A	$1 - 1 \cdot 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \cdot 10^{-4}$ a $1 - 1 \cdot 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
Aproximación inicial						
Aproximación intermedia	220 m	N/A	$1 - 1 \cdot 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \cdot 10^{-4}$ a $1 - 1 \cdot 10^{-8}/h$	0,99 a 0,99999
NPA Salidas						
Aproximación con guiado vertical (APV-I)	16 m	20 m	$1 - 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximación	10 s	$1 - 8 \cdot 10^{-6}/$ 15 s	0,99 a 0,99999
Aproximación con guiado vertical (APV-II)	16 m	8 m	$1 - 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximación	6 s	$1 - 8 \cdot 10^{-6}/$ 15 s	0,99 a 0,99999
Aproximación CAT I	16 m	4 a 6 m	$1 - 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximación	6 s	$1 - 8 \cdot 10^{-6}/$ 15 s	0,99 a 0,99999

Tabla 4.10: Requisitos de rendimientos por operación. [42]

En la Tabla 4.10 se comprueba que los requisitos son muy estrictos y los sistemas GNSS no pueden satisfacerlos. Por ello, se crean las aumentaciones, que nacen con el objetivo de mejorar las precisiones y eliminar la mayoría de las limitaciones.

Las aumentaciones se clasifican según si están basadas en los sistemas de a bordo de las aeronaves (ABAS), sistemas satelitales (SBAS) o sistemas terrestres (GBAS). A continuación se hace una introducción a los sistemas ABAS y GBAS, tratándose el SBAS en profundidad en el Capítulo 5.

4.4.1. ABAS

El sistema de aumentación basado en aeronaves o *Aircraft Based Augmentation System* (ABAS) funciona a través de la integración de información de GNSS con la información disponible a bordo de la aeronave.

La técnica ABAS más común se llama monitorización autónoma de la integridad del receptor (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM)). Este sistema se basa en la realización de medidas redundantes de las pseudodistancias de los satélites para poder detectar si hay alguna señal defectuosa y en tal caso emitir una alerta. Este método de funcionamiento implica que el sistema no estará disponible el 100 % del tiempo. No obstante, otra técnica ABAS consiste en la integración de la información GNSS con los datos de sensores de la aeronave, como los sensores inerciales [91].

Empieza a aprobarse el uso de constelaciones GNSS para la navegación en zonas oceánicas y remotas, donde antes se utilizaban otras técnicas de navegación, como la navegación inercial, dado que en estas zonas no hay infraestructura NAVAID terrestre. En este caso, si se utiliza la técnica RAIM de ABAS, también deberá usarse un sistema capaz de excluir de las mediciones cualquier satélite que RAIM indique como defectuoso. Dicho sistema se llama detección y exclusión de fallos (*Fault Detection and Exclusion* (FDE)). Cuando los dos sistemas funcionan conjuntamente, cualquier medición que sea errónea será automáticamente descartada y se podrán seguir ofreciendo datos fiables. El principal inconveniente de este *modus operandi* es que se necesitará redundancia de pseudodistancias (más de cuatro satélites visibles).

También se puede utilizar la otra técnica de ABAS. Esta implica la integración de datos de los sensores inerciales con los datos GNSS y también utiliza FDE, consiguiendo mejorar la disponibilidad de GNSS.

El uso del sistema ABAS representa a menudo el primer paso de una transición gradual hacia un uso completo de los sistemas GNSS para todas las fases del vuelo. Es decir, suele ser la primera aumentación en implementarse.

4.4.2. GBAS

El GBAS (*Ground Based Augmentation System*) o sistema de aumentación basado en tierra, a diferencia del ABAS, es un sistema de cobertura de área. Es decir, el ABAS es un sistema a bordo del avión que puede usarse en cualquier fase del vuelo y que proporciona correcciones absolutas. En cambio, el GBAS es una instalación de infraestructura terrestre que proporcionará correcciones diferenciales y monitorización de la integridad de los sistemas GNSS en su área de influencia.

GBAS es empleado principalmente para proporcionar correcciones en la cercanía de los aeropuertos y conseguir así proporcionar integridad y mayor precisión. El fin de este sistema sería

actuar como un sustituto de los sistemas ILS, dando soporte a todas las fases de la aproximación. Un gran beneficio que tiene frente a ILS es su coste y su flexibilidad.

La infraestructura de este sistema suele componerse de un mínimo de tres antenas receptoras (de señal GNSS), un centro de procesamiento, que será el encargado de realizar los cálculos de las correcciones y un transmisor de datos VHF. Este transmisor emite el mensaje de corrección dos veces por segundo de forma omnidireccional.

A bordo, la aeronave con capacidad para utilizar las correcciones del GBAS, estará equipada con un receptor multimodo que le permitirá integrar la información recibida de los satélites GNSS, el GBAS y, en caso de estar en la cercanía de un aeropuerto, del ILS también.

Las antenas receptoras de señal GNSS se colocan en puntos de los que se conoce su posición con exactitud. Así, las antenas pueden medir el tiempo de propagación de la señal y calcular las pseudodistancias, para compararlas con la distancia real entre la antena receptora y los satélites. La posición de los satélites es obtenida de las efemérides que estos transmiten. Con todo ello, el sistema es capaz de calcular el error de medida, que será transmitido a través del transmisor VHF.

La aviónica de a bordo de las aeronaves solo utilizará la señal de aquellos satélites para los que esté recibiendo correcciones del sistema GBAS. Por su parte, las instalaciones de tierra del GBAS realizan una monitorización de todos los satélites visibles. En caso de que se detecte algún problema o fallo en algún satélite, el sistema GBAS dejará de emitir correcciones para este, haciendo así que la aeronave no utilice la información que procede de este satélite defectuoso.

Capítulo 5

Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS)

El sistema de aumentación basado en satélites SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), al igual que GBAS, aplica técnicas de corrección diferencial. No obstante, en este caso, el SBAS sí es un sistema de área amplia que cubre grandes territorios como toda Europa o los Estados Unidos.

SBAS ofrece una disponibilidad mucho mayor que la que ofrecen las constelaciones de satélites GNSS o la que ofrecen GNSS+ABAS. Esto se debe a que además de proporcionar correcciones diferenciales, también emite señales de navegación adicionales e información de integridad para cada satélite.

SBAS es capaz, por tanto, de dar soporte a todas las operaciones de navegación de área (RNAV), desde el despegue hasta la aproximación. En cada vez más casos, SBAS puede proporcionar soporte para la realización de procedimientos de aproximación final con guiado vertical (APV). Es por ello que se trata de un sistema que será clave para el futuro de la reorganización del espacio aéreo, que conseguirá rutas más eficientes y, por tanto, mayor capacidad. También permitirá ir deshaciéndose gradualmente de los NAVAIDs tradicionales, reduciendo costes.

Las aproximaciones con guiado vertical (APV) que SBAS habilita son la APV I, la APV II y la LPV. Los tres procedimientos utilizan las mismas superficies de obstáculos laterales que los localizadores del tradicional ILS y son idénticos desde la perspectiva de la aviónica. APV II tiene mayor precisión vertical que APV I, y LPV tiene aún más precisión vertical que los anteriores dos. Por tanto, los de mayor precisión podrán admitir mínimos más bajos, que serán, en muchos casos, más bajos que los mínimos del aeropuerto antes de la implementación de los procedimientos con SBAS.

El procedimiento más preciso será el que ofrece rendimiento de localizador con guiado vertical (*Localiser Performance with Vertical guidance (LPV)*). Este, como ya se veía en la Figura 3.14 se clasifica como un procedimiento APV. Es capaz de dar rendimientos y tiene características similares al ILS, pero con la ventaja de que no requiere de ninguna infraestructura terrestre en el aeropuerto. Con la ayuda de los sistemas SBAS, los procedimientos LPV pueden llegar a tener mínimos de hasta 200 pies (LPV-200) o 60,96 m, lo cual es equivalente al uso de ILS CAT I [92].

El primer sistema SBAS en entrar en funcionamiento fue el *Wide Area Augmentation System (WAAS)* de Estados Unidos, en 2003. Europa cuenta con el *European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)*. Estos dos, que se estudiarán a continuación en mayor profundidad, son los sistemas de mayor relevancia por su nivel de implementación. No obstante, otros países también cuentan con su propio sistema SBAS, tal y como se ve en la Figura 5.1.

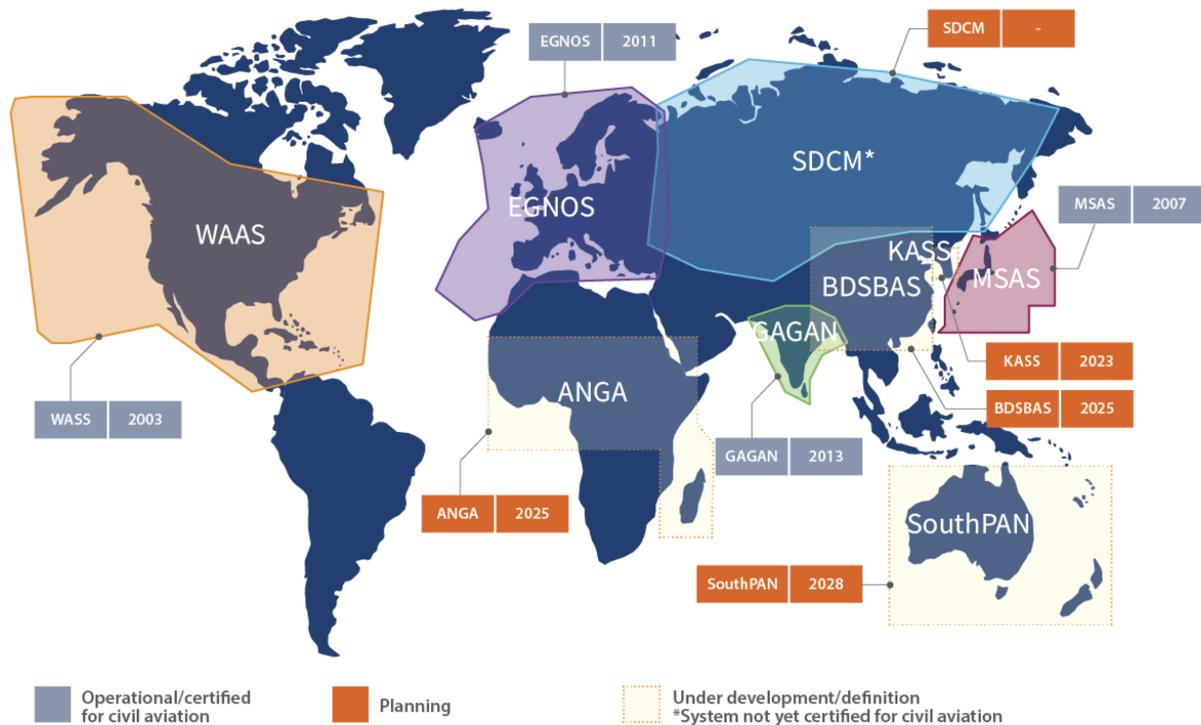


Figura 5.1: Áreas de servicio de los diferentes SBAS¹[21].

En la Figura 5.1 se observa que los únicos otros dos sistemas SBAS operativos son el *Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS)* de Japón y el *GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN)* de India.

Otros países trabajan también en su sistema propio:

- Rusia: *System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM)*.
- Corea del Sur: *Korea Augmentation Satellite System (KAAS)*.
- China: *BeiDou SBAS (BDSBAS)*

¹Esta imagen muestra los datos e información disponible a fecha de septiembre de 2022. Sujeto a cambios.

- Australia y Nueva Zelanda: *Southern Positioning Augmentation Network* (SouthPAN).
- Países pertenecientes a ASECNA: *Augmented Navigation for Africa* (ANGA).

Todos los sistemas en funcionamiento y en desarrollo son compatibles entre sí e interoperables. Además, comparten una arquitectura y funcionamiento similar, que pasa a explicarse a continuación.

5.1. Arquitectura

De modo similar a las constelaciones GNSS, los sistemas SBAS también se subdividen en segmentos. No obstante, se trata ahora de un total de cuatro segmentos, pues se suma el segmento de soporte [93]:

- **Segmento espacial:** se compone de un conjunto de satélites geoestacionarios (GEO) cuya carga útil es un transpondedor. Este transpondedor será el encargado de transmitir el mensaje de navegación SBAS, que se ha generado en tierra y que se modulará sobre banda L.

Además, normalmente, también se cuenta con una segunda frecuencia de enlace de datos descendente, de banda C, con el objetivo de mitigar los efectos del retardo de la señal propagada por la atmósfera.

En la actualidad, se evoluciona hacia transpondedores con mayor banda ancha, mayor potencia de transmisión y posibilidad de emisión en frecuencia doble (L1/L2).

- **Segmento tierra:** es el encargado de generar y enviar a los satélites GEO la señal de aumentación que será transmitida. Para ello, este segmento se subdivide en:

- Red de estaciones de monitorización: encargada de recopilar datos de los satélites GNSS y la ionosfera. Se trata de una densa red de estaciones con capacidad de realizar su función con la precisión y disponibilidad que el sistema SBAS requiere. Estas estaciones se reparten por toda el área de cobertura (área de servicio) del sistema SBAS correspondiente, de forma que se tiene redundancia. A menudo, también se sitúan unas pocas estaciones en el exterior de esta área.

- Centro de instalaciones de procesamiento: es el elemento más importante en el cumplimiento de los requisitos de rendimiento del SBAS.

Se encarga de procesar todos los datos de entrada que son proporcionados por las estaciones de monitorización, realizar estimaciones con respecto a las correcciones del satélite, el modelo ionosférico y la variación del error, así como realizar un análisis de la integridad. Con todo ello genera un resultado, que será una corrección que cumpla con los estándares SBAS.

Para poder realizar todas estas tareas, se hace uso de algoritmos de determinación de órbita, determinación del tiempo de referencia SBAS, estimación ionosférica y estimación de la integridad.

- Centro de control de los satélites GEO: una vez obtenida la corrección, estos centros se ocupan de generar la señal con el mensaje correctivo y transmitirlo a los satélites GEO.

Para ello, primero preparan la generación de la señal y la codificación por ruido pseudoaleatorio (PRN). A continuación, modulan el mensaje de corrección en la señal y sincronizan esta señal con el tiempo de referencia SBAS, para luego emitirla. Por último, se cierra el ciclo de control analizando la señal de bajada de los satélites.

- **Capa de comunicación:** se ocupa de asegurar la interconexión de todos los elementos del segmento tierra en tiempo real. Además, lo hace siguiendo altos estándares que garantizan un ancho de banda suficiente y estrictos requisitos de redundancia y seguridad.

- **Segmento usuario:** de modo similar a las constelaciones GNSS, este segmento se conforma por todos aquellos receptores con capacidad para recepción y uso de la señal SBAS.

- **Segmento de soporte:** no se relaciona directamente con el servicio del SBAS. No obstante, sí se compone de elementos que son necesarios para el desarrollo y funcionamiento del sistema. Es decir, este segmento es el encargado de las fases de diseño, desarrollo, validación, despliegue, certificación, operación, mantenimiento y solución de problemas.

Este segmento hace uso de simuladores de extremo a extremo para comprobar como sería el comportamiento real del sistema (retraso, problemas de comunicación, algoritmos, etc.). También se emplean simuladores de volumen de servicio para evaluar el rendimiento.

Forman parte de este segmento, además, todo tipo de herramientas de monitorización, y herramientas de análisis, que verificarán que se cumplan con los estándares de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad.

5.2. Principio matemático de funcionamiento

En la Sección 4.1 se mostraban las ecuaciones que los sistemas GNSS empleaban para el cálculo de las pseudodistancias y que le permitían al receptor conocer su posición. Del mismo modo, los sistemas SBAS cuentan con un modelo matemático que les permite aplicar las correcciones diferenciales [94].

Los sistemas SBAS realizan la sincronización temporal por medio de correlación del código. Por tanto, recordando lo ya explicado en la Sección 4.1, para una época t , la pseudodistancia entre un satélite j y un receptor i , puede expresarse como:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c\Delta\delta_i^j(t) \quad (4.5)$$

donde $R_i^j(t)$ es la pseudodistancia medida entre el receptor en i y el satélite en j , $\rho_i^j(t)$ es la distancia geométrica entre el satélite y el punto de observación y $\Delta\delta_i^j(t)$ representa las desviaciones de los relojes del satélite y del receptor. Por tanto, $c\Delta\delta_i^j(t) = \delta^j - \delta_i$ es una distancia que está asociada a los errores de sincronización de los relojes del satélite δ^j y del receptor δ_i .

Esta distancia geométrica $\rho_i^j(t)$ se puede expresar como:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (4.6)$$

donde $X^j(t)$, $Y^j(t)$ y $Z^j(t)$ son las coordenadas del vector posición del satélite y X_i , Y_i , Z_i son las tres coordenadas incógnitas del receptor en una época (instante) t .

Como se comentaba en la Sección 5.1, los sistemas SBAS funcionan con estaciones de monitorización (base), de las que se conoce la posición, y receptores de posición desconocida. Por tanto, se puede particularizar la Ecuación 4.5 para una estación base A , en la época t_0 . Además, a la ecuación de le añadirá el término $\Delta\rho_A^j(t_0)$, que, por simplicidad, es el que hace referencia a los errores radiales de la órbita y la refracción ionosférica y troposférica. Con ello se tiene:

$$R_A^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) + \Delta\rho_A^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_A(t_0) \quad (5.1)$$

Dado que la posición de los satélites será conocida gracias al mensaje de navegación y la posición de la estación base A también se conoce, usando la Ecuación 4.6, se podrá obtener $\rho_A^j(t_0)$.

Por tanto, para la época t_0 , la corrección de las pseudodistancias (*Pseudorange Corrections* (PRC)) vendrá dada por la diferencia entre la distancia geométrica y la pseudodistancia:

$$PRC^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) - R_A^j(t_0) = -\Delta\rho_A^j(t_0) + c\delta^j(t_0) - c\delta_A(t_0) \quad (5.2)$$

Mediante un proceso de derivación numérica, aplicado a una serie temporal de datos de correcciones de pseudodistancias, es posible calcular la corrección de variaciones de distancia (*Rangerate Corrections* ($RRC^j(t_0)$)). De esta manera, se puede aproximar la corrección de pseudodistancias (PRC) a cualquier momento t :

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0) \quad (5.3)$$

donde el intervalo $t - t_0$ garantiza la obtención de mejor precisión. De manera similar, es posible modelar la pseudodistancia en la estación remota B :

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_B(t) \quad (5.4)$$

Ahora, se pueden aplicar las correcciones de la Ecuación 5.3, que darán como resultado la pseudodistancia corregida de B :

$$\begin{aligned} R_B^j(t)_{corr} &= R_B^j(t) + PRC^j(t) = \\ &= (\rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_B(t)) + (-\Delta\rho_A^j(t) + c\delta^j(t) - c\delta_A(t)) \end{aligned} \quad (5.5)$$

donde se puede agrupar y simplificar:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) - \cancel{c\delta^j(t)} + c\delta_B(t) - \Delta\rho_A^j(t) + \cancel{c\delta^j(t)} - c\delta_A(t) \quad (5.6)$$

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t)) \quad (5.7)$$

En la Ecuación 5.7, si se considera que la distancia entre la estación base y el receptor no es extremadamente grande, los errores ($\Delta\rho_B^j(t)$ y $\Delta\rho_A^j(t)$) pueden considerarse iguales, y se anulan. Si además agrupamos $\Delta\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (5.8)$$

Con la obtención de la Ecuación 5.8, se demuestra matemáticamente que los sistemas SBAS consiguen eliminar el error del reloj del satélite, los errores por retraso ionosférico, troposférico y los errores radiales de órbita, quedando en la fórmula solo la distancia geométrica y los errores del receptor y estación base.

5.3. Sistemas SBAS

Como se comentaba en la introducción, hay un total de cuatro sistemas SBAS operativos a nivel mundial: EGNOS (Europa), WAAS (Estados Unidos), MSAS (Japón) y GAGAN (India). De ellos se van a analizar y comparar en profundidad el sistema EGNOS y el WAAS por ser los más relevantes.

Los sistemas presentarán particularidades en su arquitectura y segmentos, diferentes servicios prestados y diferentes prestaciones. Y sobre todo, cada uno de los sistemas tendrá en su territorio un nivel de integración.

5.3.1. EGNOS

5.3.1.1. Arquitectura

Por similitudes, en la Sección 5.1 ya se hacía una descripción general de los segmentos que componen las arquitecturas de los segmentos SBAS. No obstante, cabe destacar las peculiaridades que diferencian al sistema EGNOS en dos segmentos:

- **Segmento espacial:** en el caso de EGNOS, este segmento se compone de un total de tres satélites GEO que emiten, en la banda L1 (1575,42 MHz), las correcciones y la información de integridad para los satélites GPS. En total han formado parte del sistema cuatro satélites [95, 22]:
 - *Inmarsat 3F2 AOR-E (PRN 120):* satélite retirado en enero de 2019.
 - *Inmarsat 4F2 Emea (PRN 126):* satélite operativo sometido. Lanzado en noviembre de 2005.
 - *Astra Ses-5 (PRN 136):* satélite operativo. Lanzado en julio de 2012.
 - *Astra-5B (PRN 123):* satélite operativo. Lanzado en junio de 2014.

Con el uso de estos tres satélites se suele conseguir un nivel bastante alto de redundancia. No obstante, durante los periodos en los que se realizan tests a los satélites, esta redundancia se ve afectada. Los tests más recientes son a los satélites PRN 123 y el PRN 126, con lo que se lograba lo mostrado en las Figuras 5.2 y 5.3.

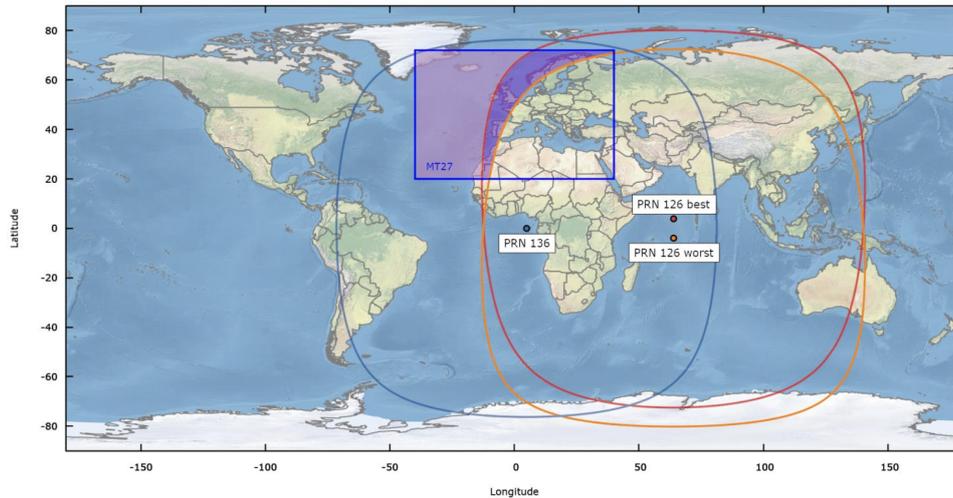


Figura 5.2: Área de cobertura durante el test del satélite PRN 123 [22].

El marco azul MT27 es la región geográfica en la que el mensaje de servicio de EGNOS es emitido. El área tintada de rosa es la zona sobre la que no había redundancia durante el test del satélite PRN 123. Por tanto, en esta región solo se recibía señal de un satélite. De igual modo, durante la realización de los tests al satélite PRN 126, también se genera una región en la que solo se recibe señal de un satélite. En este caso, como se ve en la Figura 5.3, es una región menor.

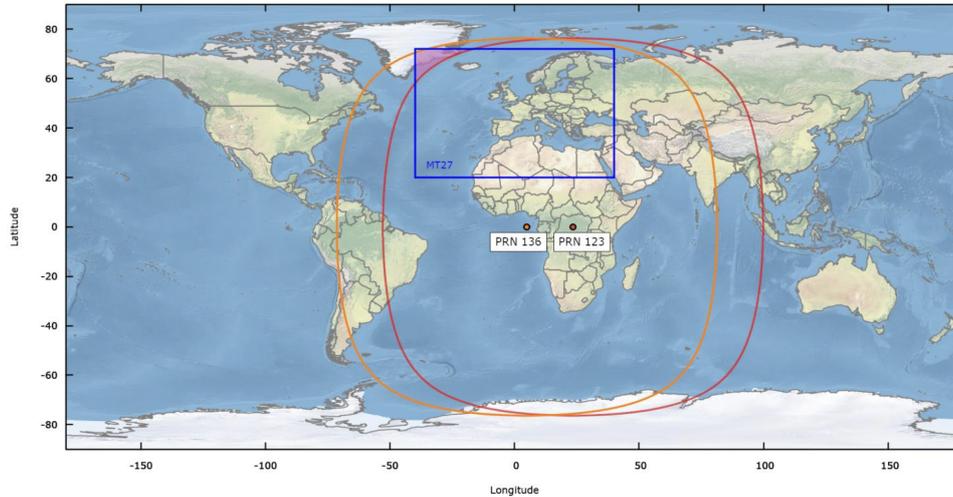


Figura 5.3: Área de cobertura durante el test del satélite PRN 126 [22].

El objetivo es conseguir un segmento espacial en el que se pueda mantener una buena redundancia de forma constante.

Cabe destacar que los dos satélites más recientes, SES-5 y ASTRA-5B, tienen a bordo un transpondedor capaz de transmitir señales de doble frecuencia. Estas señales cumplen con las especificaciones de señal GPS L1/L5 y Galileo E1/E5. No obstante, en la actualidad solo se realizan transmisiones en banda L1 [96].

- **Segmento tierra:** formado por una red de treinta y nueve estaciones de monitorización de integridad (*Ranging Integrity Monitoring Stations (RIMS)*), dos centros de control de misión (*Mission Control Centres (MCC)*), dos estaciones terrestres de navegación (*Navigation Land Earth Stations (NLES)*) por cada GEO y la red de área amplia EGNOS (*EGNOS Wide Area Network (EWAN)*). Adicionalmente, y para apoyar las operaciones del sistema y la prestación de servicios, se despliegan otras dos instalaciones: la instalación de evaluación y revisión del rendimiento (*Performance Assessment and Checkout Facility (PACF)*) y la instalación de cualificación específica de la aplicación (*Application Specific Qualification Facility (ASQF)*):
 - **RIMS:** las treinta y nueve estaciones se distribuyen mayoritariamente a lo largo y ancho de la geografía europea. No obstante, también hay estaciones que se ubican en otros continentes, tal y como se muestra en la Figura 5.4. Cabe mencionar que, inicialmente, la configuración que EGNOS utilizaba, contaba con cuarenta RIMS.



Figura 5.4: Distribución actual de las 39 estaciones RIMS [23].

Las RIMS están al cargo de recopilar diferentes mediciones de los satélites GPS y transmitir estos datos brutos (sin procesar) a los MCC, concretamente, a sus instalaciones centrales de procesamiento (*Central Processing Facilities (CPF)*).

- MCC: tienen dos principales módulos:
 - Instalación central de procesamiento (*Central Processing Facility* (CPF)): reciben los datos que las RIMS recompilan para:
 - Elaborar correcciones del reloj para cada uno de los satélites GPS que las RIMS ven. Estas correcciones son válidas para toda el área de cobertura del sistema EGNOS.
 - Elaborar correcciones de las efemérides de los satélites, para obtener una precisión mejorada de las posiciones orbitales de estos. Estas correcciones, aunque sí son válidas para toda el área de cobertura de EGNOS, son menos precisas con el aumento de distancia al centro del área de servicio
 - Elaborar un modelo para errores ionosféricos sobre toda el área de servicio de EGNOS. Cabe destacar que este cálculo es diferente a los anteriores. Los errores del reloj y de las efemérides se calculan sobre cada satélite. Para el modelo ionosférico se elabora una malla en la que cada punto tiene una corrección distinta.
 - Además de todo esto, también se estiman los errores residuales que los usuarios pueden tener una vez aplicadas las correcciones. Estos errores vienen dados por el parámetro UDRE y GIVE. UDRE es una estimación del error residual de distancia después de la aplicación de las correcciones de reloj y efemérides. GIVE es una estimación del error vertical residual después de la aplicación de los errores ionosféricos.
 - Por último, la CPF también es capaz de detectar cualquier anomalía en alguno de los satélites GPS o EGNOS para advertir a los usuarios en un tiempo menor al tiempo de alerta (TTA).
 - Instalación central de control (*Central Control Facility* (CCF)): encargadas del control del sistema EGNOS, controladas 24/7 para asegurar el servicio.
- NLES: su función consiste en recoger la información recibida de la CPF, modular el mensaje, sincronizarlo con el tiempo GPS y transmitirlo a los satélites GEO. Estas instalaciones tienen redundancia, con dos NLES por GEO, de forma que una está activa y la otra de reserva.
- EWAN: proporciona la red de comunicación para todos los componentes del segmento terrestre.

En una imagen, el segmento tierra y espacio puede verse como en la Figura 5.5, en la que se ve como las RIMS recopilan información de los satélites GPS, la cual se transmite a los MCCs, y una vez realizadas las correcciones, los NLES transmiten la señal a los GEO de EGNOS. Los usuarios reciben conjuntamente la señal GPS y la corrección de GPS.

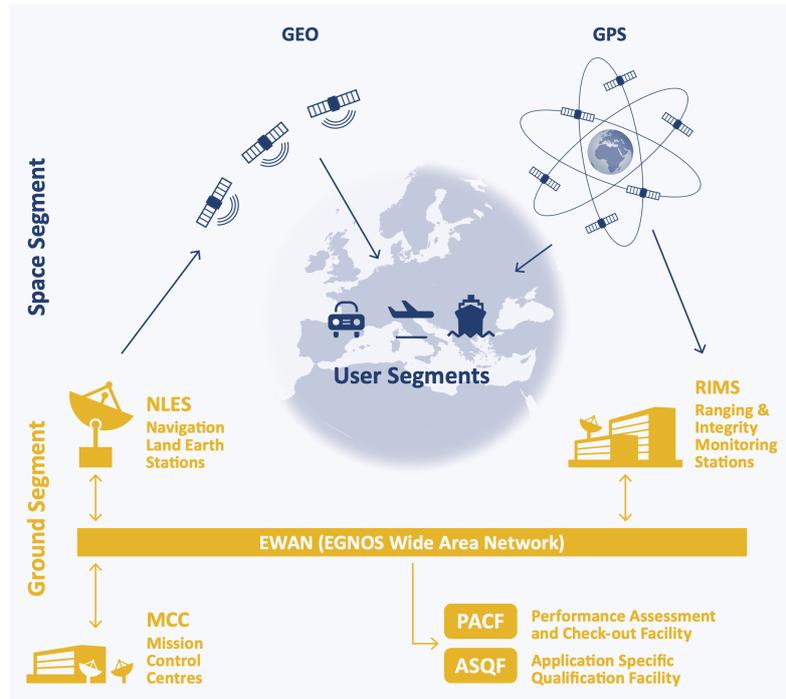


Figura 5.5: Arquitectura de EGNOS [23].

5.3.1.2. Servicios

EGNOS es completamente interoperable con otros sistemas SBAS existentes. Proporciona correcciones e información de integridad de las señales GPS a través de tres servicios:

- **Servicio abierto (*Open Service (OS)*):** es accesible gratuitamente en toda Europa. Tan solo requiere que el usuario esté equipado con un receptor compatible con GPS/SBAS, para el que no se requiere una certificación de receptor específica.

EGNOS OS ha estado disponible desde el 1 de octubre de 2009.

- **Servicio *Safety of Life (SoL)*:** proporciona el mayor nivel de rendimiento de la SIS. Su objetivo principal es apoyar las operaciones de aviación civil, y para poder proporcionar este servicio, el sistema EGNOS fue diseñado para que su *Signal-In-Space (SIS)* cumpla con los requisitos de la OACI para SBAS. El servicio SoL de EGNOS lleva desde el 2 de marzo de 2011 en operativo.

Hasta el momento, tan solo se ha realizado una caracterización detallada del rendimiento con los requisitos para aviación civil, pero el servicio SoL también podría utilizarse en otros sectores.

Inicialmente, en marzo de 2011, fueron declarados dos niveles de servicio de EGNOS SoL: NPA y APV-I. En septiembre de 2015, se declaraba un nivel adicional: LPV-200.

- **Servicio de acceso a datos de EGNOS (*EGNOS Data Access Service (EDAS)*):** recopila los datos terrestres y permite el acceso en tierra a los datos de EGNOS en tiempo real y también en un archivo FTP histórico a los usuarios autorizados. Se trata del único modo de acceso para los datos recopilados y generados por la infraestructura terrestre de EGNOS.

De este modo, cualquier proveedor de servicios autorizado podrá acceder al servidor de datos de EGNOS y explotarlos, pudiendo ofrecer servicios de alta precisión a los clientes finales.

El EGNOS EDAS está disponible desde el 26 de julio de 2012.

5.3.1.3. Rendimiento

De todos los servicios ofrecidos, va a analizarse el de SoL, por ser el que está destinado a aviación civil y el que mayor rendimiento puede ofrecer. En la Tabla 5.1 se ven los valores de rendimiento que el sistema EGNOS es capaz de ofrecer.

	Precisión		Integridad		Continuidad	Disponibilidad
	Horizontal 95 %	Vertical 95 %	Integridad	Tiempo de alerta TTA		
NPA	220 m	N/A	$1 - 1 \cdot 10^{-7}/h$	Menos de 6 s	$< 1 - 1 \cdot 10^{-3}/h$ en la gran parte de ECAC* $< 1 - 2,5 \cdot 10^{-3}/h$ en el resto de ECAC*	0,999 en toda la ECAC*
APV-I & LPV-200	3 m	4 m	$1 - 2 \cdot 10^{-7}/$ aproximación	Menos de 6 s	$< 1 - 1 \cdot 10^{-4}$ por cada 15 s en el corazón de ECAC* $< 1 - 5 \cdot 10^{-4}$ por cada 15 s en el resto de ECAC*	0,99 en la gran parte de la ECAC*

Tabla 5.1: Valores de rendimiento del servicio SoL de EGNOS [23].

Se observa como la gran parte de los valores del rendimiento son suficientes para cumplir con los requisitos establecidos por OACI para los diferentes procedimientos (ver Tabla 4.10). No obstante, sí se puede observar como el estándar del rendimiento de la continuidad del sistema no es suficiente para satisfacer el requisito de la OACI ($1 - 8 \cdot 10^{-6}$), pues llega a superar hasta en dos órdenes de magnitud a este (para el caso de APV-I y LPV-200).

Dada esta circunstancia, lo que se suele hacer es asumir el riesgo de continuidad. Es decir, los aeropuertos, aeronaves y tripulación para la que se habilitan los procedimientos NPA, APV-I o LPV-200 asumen el riesgo que supone no cumplir con la condición de continuidad.

Con el objetivo de clarificar la continuidad y disponibilidad que el sistema EGNOS es capaz de ofrecer para cada uno de los procedimientos, se procede a mostrar esto sobre mapas. La elaboración de estos mapas se basa en la observación del rendimiento de EGNOS durante varios meses.

Los mapas que se muestran a continuación, representan el nivel mínimo de rendimiento esperado en circunstancias similares a las de la observación, que son:

- Configuración de RIMS mostrada en la Figura 5.4.
- Configuración de los GEO en la que al menos dos de tres satélites están operativos.
- Treinta y un GPS PRNs identificados.

* A continuación se muestran mapas de continuidad y disponibilidad.

- Condiciones atmosféricas en las que hay una actividad ionosférica moderada. Durante períodos de gran actividad ionosférica, los usuarios del servicio SoL pueden experimentar errores residuales.

Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran la disponibilidad y continuidad de EGNOS para procedimientos APV-I. Islas como las Canarias o Feroe pueden verse afectadas por el cambio en las condiciones atmosféricas o de observación. Otras como las Azores o Chipre no tienen servicio de continuidad y en el caso de las Azores tampoco de disponibilidad. Países del este, como Bulgaria, Rumania o Grecia, así como el norte de Noruega, Suecia y Finlandia también tienen menor rendimiento del servicio en ciertas zonas.

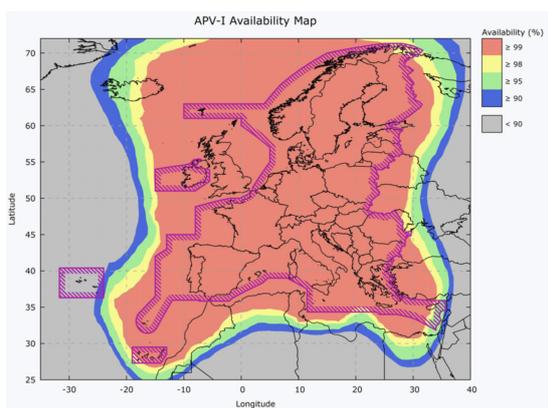


Figura 5.6: Disponibilidad para procedimientos APV-I [23].

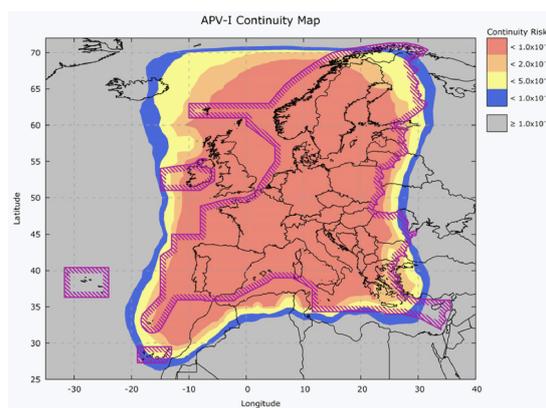


Figura 5.7: Continuidad para procedimientos APV-I [23].

En las Figuras 5.8 y 5.9, de nuevo, se ve como las zonas que se pueden ver afectadas y quedarse sin cobertura son las zonas extremas, especialmente islas. En este caso se observa como regiones como Canarias o Irlanda se ven más afectadas, sobre todo por la falta de continuidad. Pero, en general, todos los países que se encuentran en los extremos tienen zonas de rendimiento degradado.

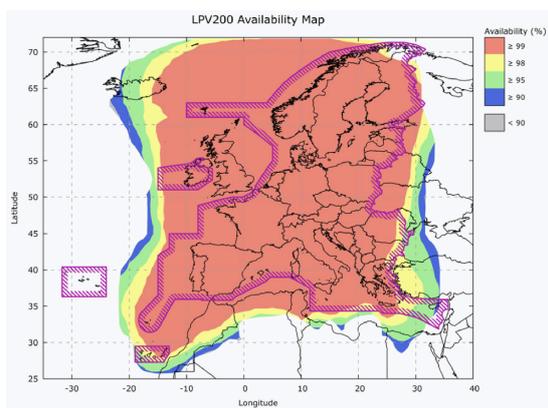


Figura 5.8: Disponibilidad para procedimientos LPV-200 [23].

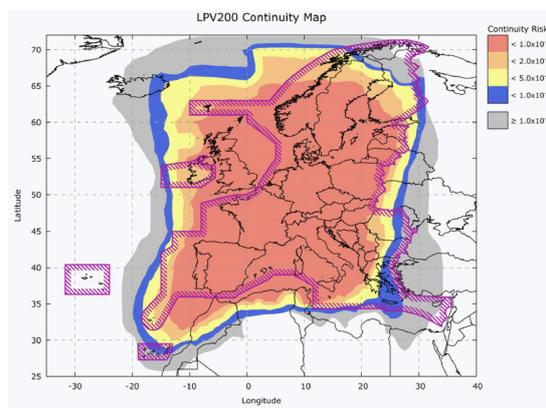


Figura 5.9: Continuidad para procedimientos LPV-200 [23].

Para el caso de ambos procedimientos, los requisitos de disponibilidad solo se cumplen en la zona roja ($> 99\%$). El riesgo de continuidad, es, como se comentaba anteriormente, mayor al

que exige la OACI para cualquiera de los dos procedimientos. No obstante, valores de hasta $1 \cdot 10^{-3}$ (toda el área pintada: roja, naranja, amarilla o azul), se consideran suficientes para poder iniciar el uso de EGNOS en aviación civil. De hecho, las normas y prácticas recomendadas (SARPs) de la OACI establecen que se pueden publicar procedimientos, aunque no se cumplan los requisitos para un sistema dado. En este caso, las autoridades de navegación aérea estatales estarán al cargo de establecer procedimientos de mitigación de riesgo, si fuese necesario.

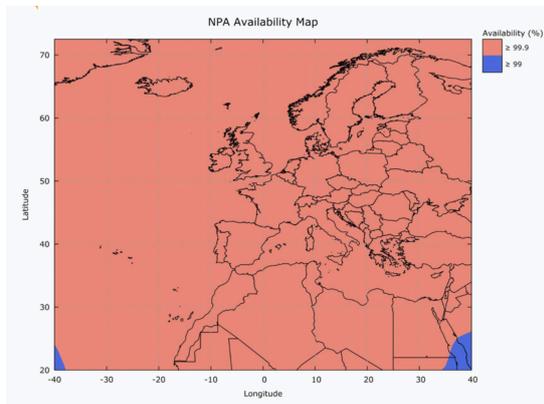


Figura 5.10: Disponibilidad para procedimientos NPA [23].

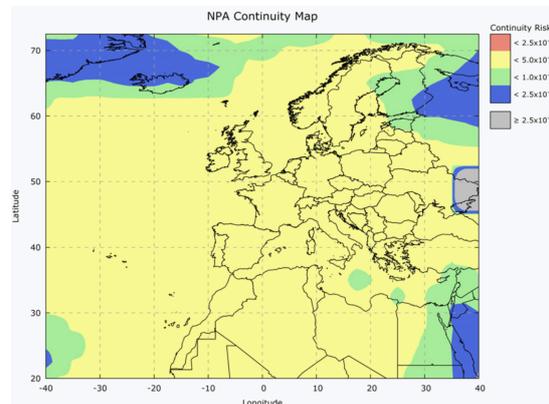


Figura 5.11: Continuidad para procedimientos NPA [23].

Por otro lado, se realizan mediciones durante un mes para comprobar los requisitos de continuidad y disponibilidad de los procedimientos NPA. Para estas mediciones se utiliza un receptor completamente operativo, todos los satélites GPS visibles y todos los GEO de EGNOS operativos. Se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 5.10 y 5.11.

En la Figura 5.10 se comprueba como la disponibilidad es total. La Figura 5.11 muestra que la continuidad, en el mejor de los casos, no es suficiente. Pero, al igual que ocurre como con los procedimientos de guiado vertical, se consideran valores suficientes para aviación civil.

Aunque los rendimientos mostrados en las Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 y mostrados en la Tabla 5.1 son los esperados, estos pueden verse modificados en función de las condiciones atmosféricas. Por ello, se realiza una monitorización en tiempo real del rendimiento de EGNOS.

5.3.1.4. Integración

Para poder comprobar el nivel de integración de EGNOS, se ha realizado un estudio del número de aerolíneas y aeropuertos en Europa que implementan procedimientos LPV [24, 97, 98], los cuales se basan en EGNOS. Todos los datos empleados son actuales a fecha de julio de 2023.

En la Figura 5.12 se pueden ver todos los aeropuertos (representados con un avión) y helipuertos (representados con un helicóptero) en los que se ha implantado al menos un procedimiento LPV (color verde) y en los que hay planes de implantación (color amarillo).

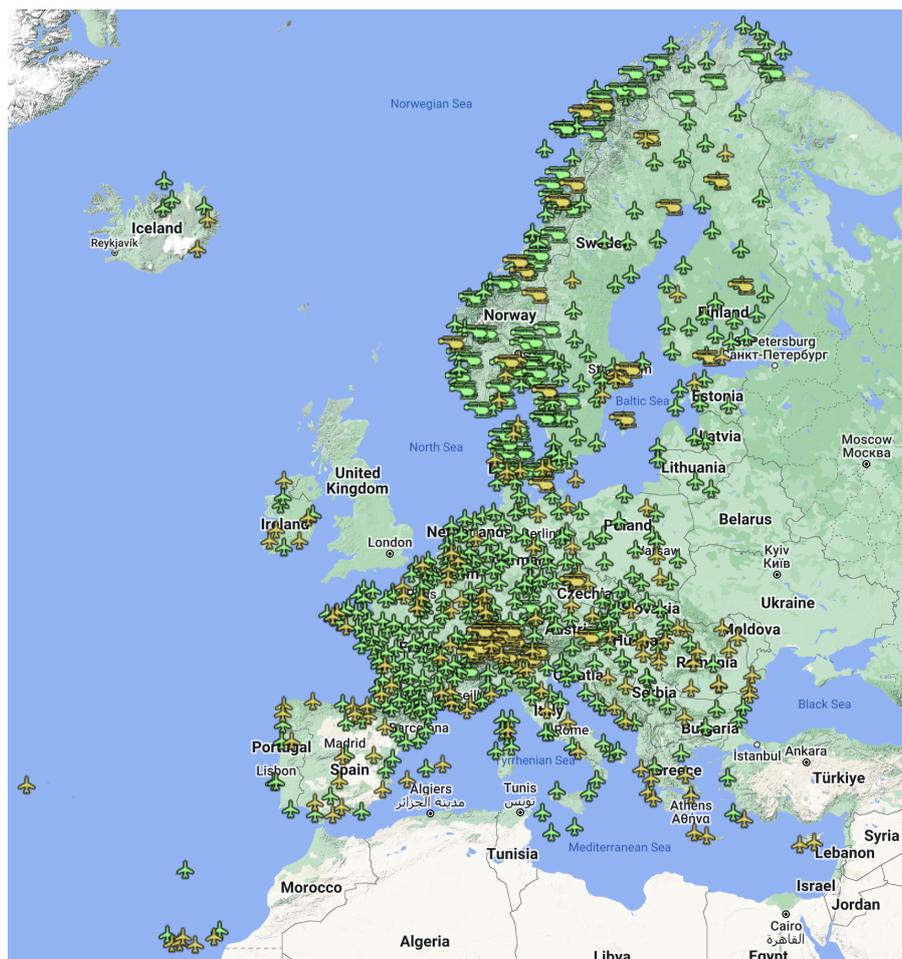


Figura 5.12: Mapa de aeropuertos y helipuertos con procedimientos LPV operativos o planificados [24].

Se han realizado los cálculos utilizando diferentes bases de datos:

- **Aeropuertos con procedimientos operativos/planificados en Europa:** se consideran las operaciones LPV, activas o planificadas (para su futura implantación), y se distingue entre operaciones LPV-200 y el resto de LPV con mayores mínimos [24].
- **Aerolíneas con aeronaves habilitadas para estos procedimientos:** extraído a partir del mapa de la página web de EGNOS User Support [24].
- **Operadores habilitados en Europa por país:** extraído de la página web Aviation Codes Central [97].
- **Aeropuertos y sus códigos:** esta base de datos reúne datos de los aeródromos de todo el mundo [98]. De ella se extrae el total de aeropuertos de cada país. Se distinguen *aeropuertos pequeños*, *aeropuertos medianos* y *aeropuertos grandes*. Por razones de simplicidad, los *aeropuertos medianos* y *aeropuertos grandes* han sido considerados aeropuertos comerciales o militares, aunque en adelante, por simplicidad, se les denomina comerciales. Por otra parte, los *aeropuertos pequeños* son considerados aeródromos de diverso propósito (entrenamiento, vuelo privado de ultraligeros...).

Se comprueba que, para el caso de España, los aeropuertos comerciales son clasificados como *aeropuertos medianos* o *grandes*. Ocurre lo mismo con las bases aéreas del Ejército del Aire, que son clasificadas como *aeropuertos medianos*. En cambio, aeródromos como el de Requena (destinado a entrenamiento de pilotos y recreación) o la Llosa (destinado a aeromodelismo y recreación), se clasifican como *pequeños*.

Con ello, se procede al análisis. En la Figura 5.13 se muestra, en porcentaje, qué países son los que más operaciones (LPV de todo tipo) tienen activas. Se ha dividido el número de operaciones activas de cada país entre el total de operaciones activas en Europa, con lo que la suma de todos los porcentajes es el 100 %.

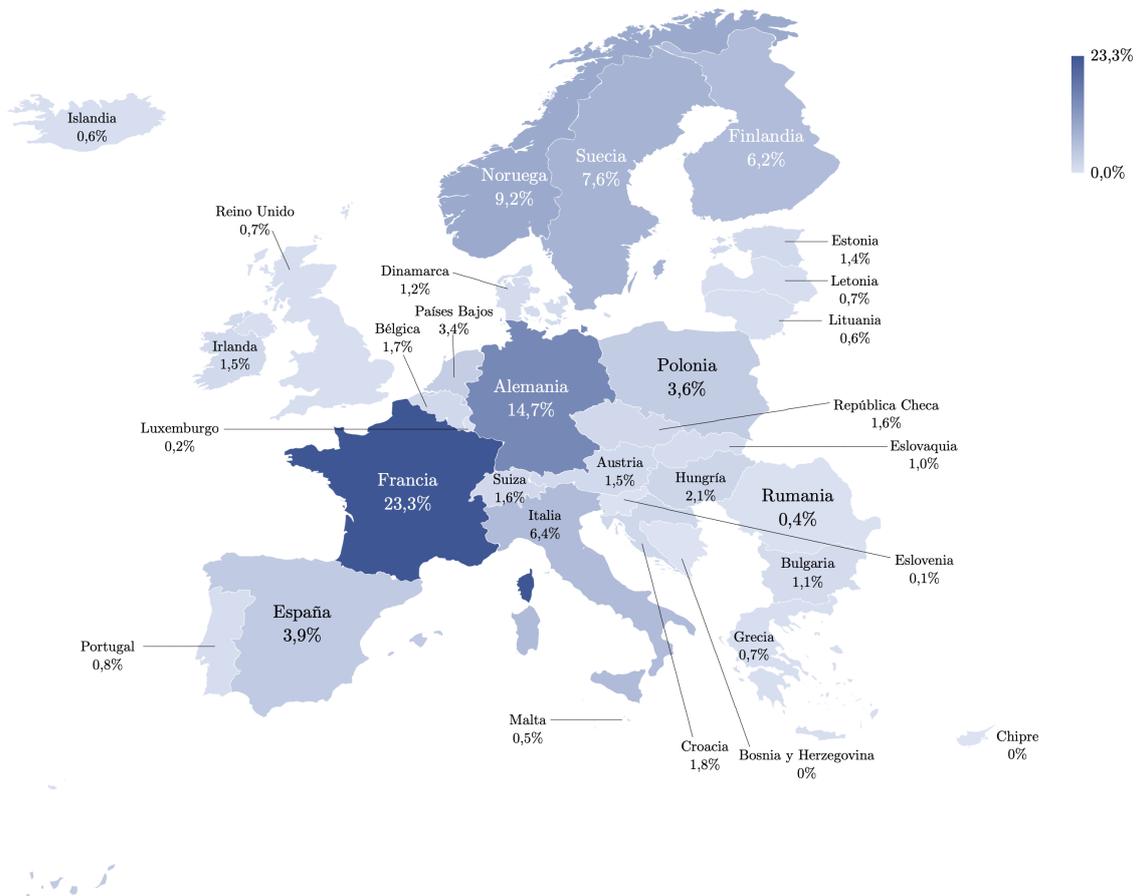


Figura 5.13: Porcentaje de operaciones activas por país²sobre el total de operaciones activas europeo.

De la Figura 5.13 se extrae que el país con mayor número de procedimientos activos es Francia (23,3%), seguido de Alemania (14,7%) y Noruega (9,2%). España queda lejos de estas primeras posiciones y se sitúa muy por detrás, con un 3,9%.

²No se muestran en el mapa los países que no tienen ningún procedimiento. Los países con un 0%, sí tienen procedimientos LPV, pero bien no son una suma significativa, o bien aún no están activos.

Un ranking similar, aunque con distintos porcentajes, es el que se observa si se realiza el mismo estudio para procedimientos LPV-200. En la Figura 5.14 se ha dividido el número de operaciones LPV-200 activas de cada país entre el total de operaciones LPV-200 activas en Europa, con lo que la suma de todos los porcentajes es el 100 %.

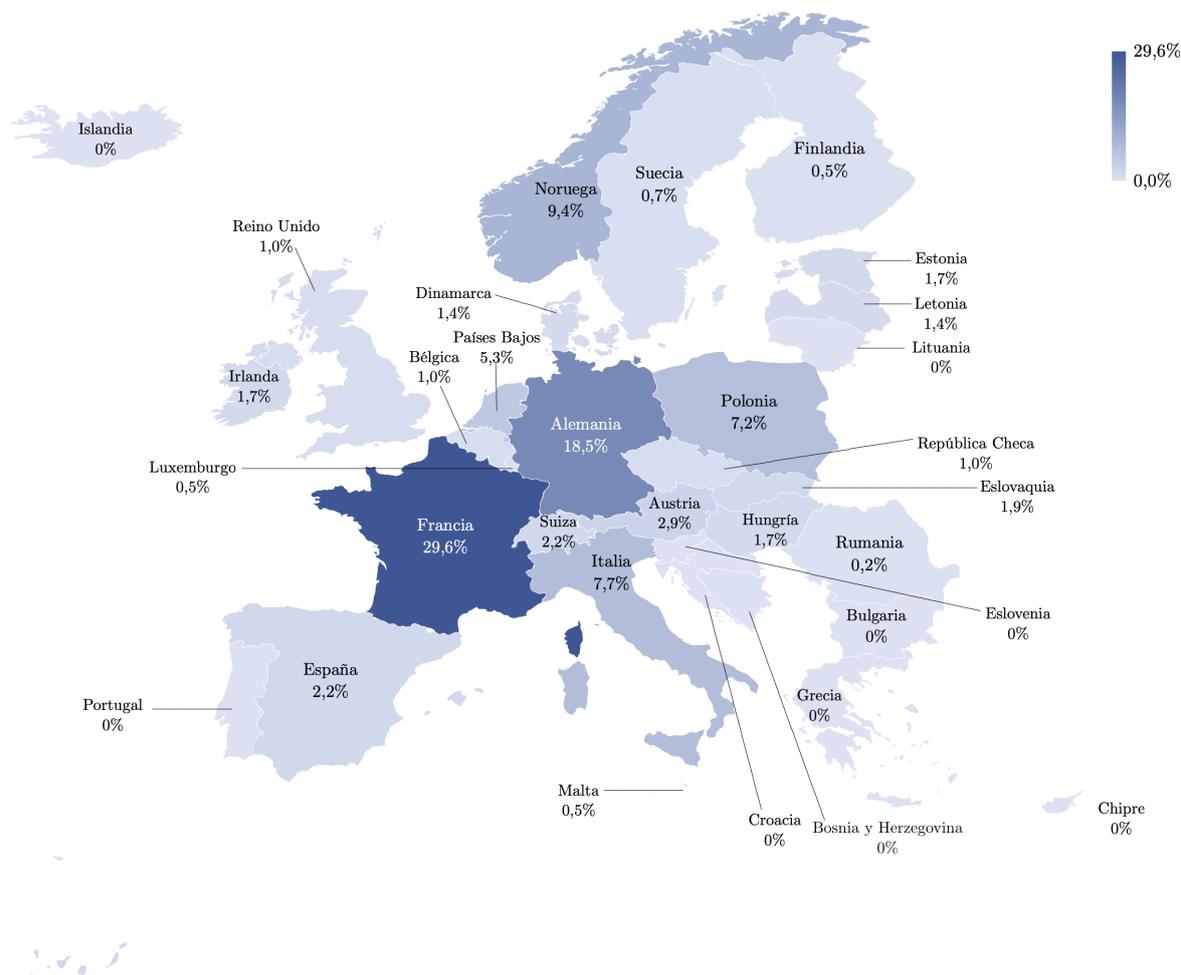


Figura 5.14: Porcentaje de operaciones LPV-200 activas por país³sobre el total de LPV-200 activas europeo.

A continuación, se procede a realizar un análisis de las operaciones LPV-200 activas por país sobre el total de operaciones activas en cada país. Los resultados se muestran en la Figura 5.15, en la que se comprueba como en ciertos países como Austria, Eslovaquia, Letonia, Luxemburgo y Polonia, el 100 % de las operaciones LPV activas tienen un mínimo de 200 pies (son LPV-200). En cambio, otros muchos países se sitúan a la cola con ninguno o pocos procedimientos LPV-200 activos. La media de todos los países se sitúa cerca del 50 % y España queda por detrás.

³No se muestran en el mapa los países que no tienen ningún procedimiento. Los países con un 0%, sí tienen procedimientos LPV, pero bien no son una suma significativa, o bien aún no están activos.

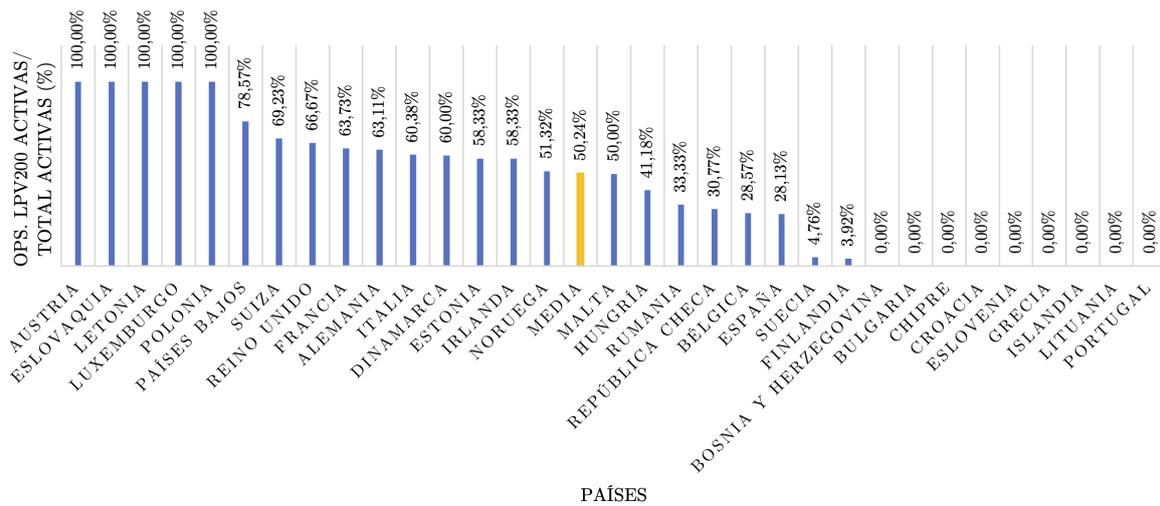


Figura 5.15: Operaciones LPV-200 sobre el total de operaciones activas.

Se comprueba también qué porcentaje de los aeropuertos que emplean procedimientos basados en LPV, cuentan con procedimientos LPV-200. En la Figura 5.16 se observa que hay países en el que el 100 % de los aeropuertos con procedimientos LPV, tienen al menos un procedimiento LPV-200. Por comparativa con la Figura 5.15 se puede saber que Malta incluye aeropuertos con procedimientos LPV y LPV-200, pero en todos sus aeropuertos hay, al menos, un procedimiento LPV-200.

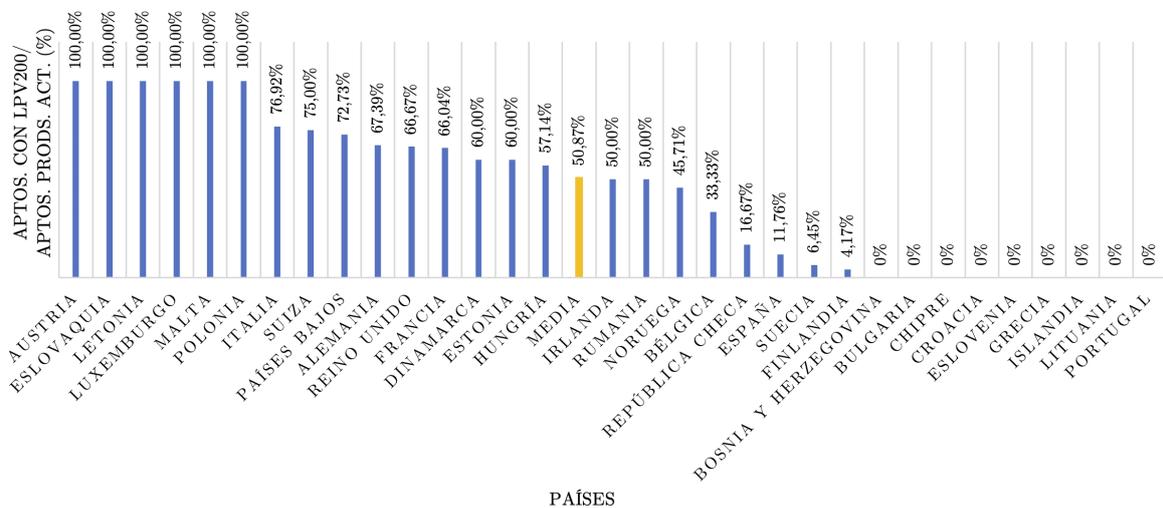


Figura 5.16: Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV activos.

España, de nuevo, queda por detrás de la media europea, con solo un 11,76 % de aeropuertos con procedimientos LPV-200, sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV. Europa muestra que de todos los aeropuertos que emplean procedimientos LPV, en un 50 % de los casos, al menos, uno de esos procedimientos, es un procedimiento LPV-200

Se pasa a comparar los aeropuertos que tienen algún procedimiento LPV o LPV-200 activo sobre el total de aeropuertos comerciales y militares (denominados comerciales por simplicidad) de cada país. Se muestran los resultados en las Figuras Figura 5.17 y Figura 5.18.

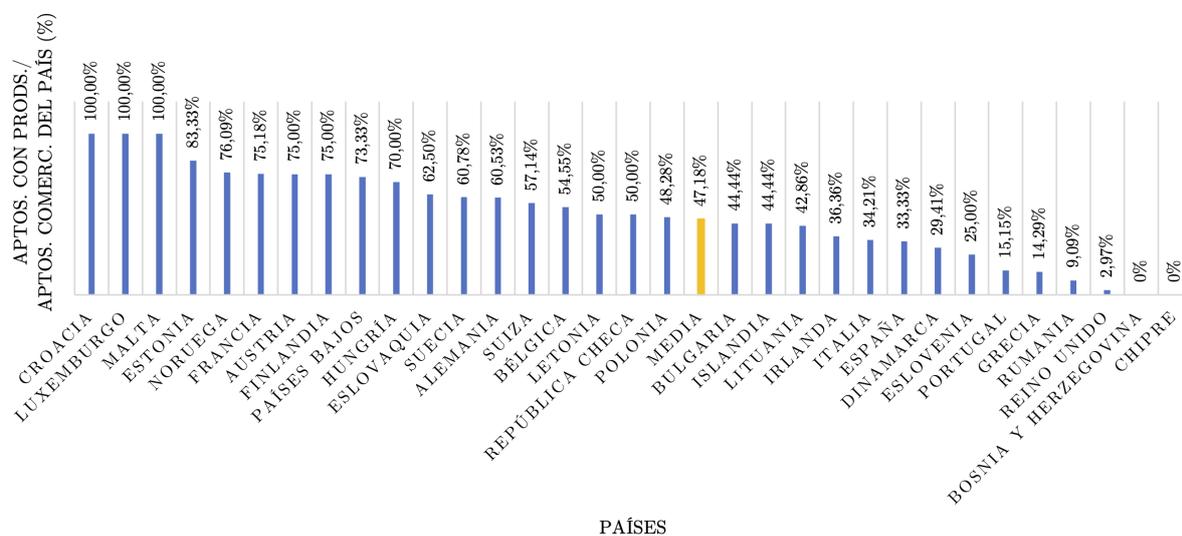


Figura 5.17: Aeropuertos con procedimientos LPV activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada país.

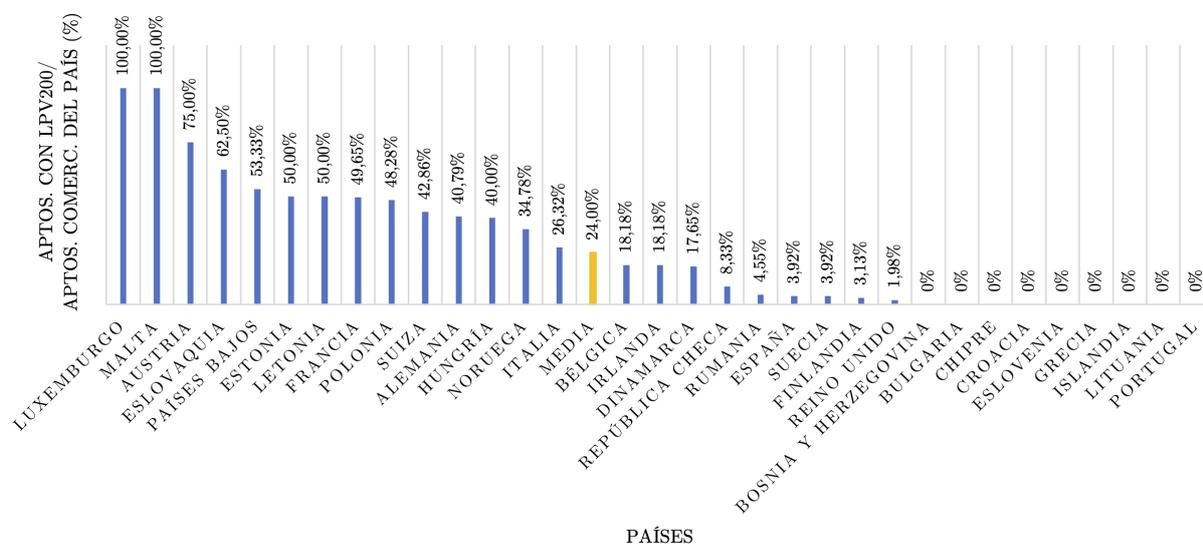


Figura 5.18: Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada país.

Se observa que hay países como Luxemburgo o Malta en los que el 100 % de los aeropuertos comerciales cuentan con procedimientos de aproximación LPV-200. Por otra parte, en Croacia, todos sus aeropuertos cuentan con procedimientos LPV, aunque ninguno de ellos es LPV-200. Países como Chipre y Bosnia y Herzegovina no tienen ningún procedimiento LPV activo, pero aparecen en la tabla debido a que sí tienen planes de implementación. Para ambas gráficas, España se queda a la cola, y para el caso de LPV-200, muy por debajo de la media.

La media europea de implantación de procedimientos LPV en aeropuertos se queda en un 47,18 %, que se reduce hasta un 24 % si se habla de procedimientos LPV-200.

Por lo que respecta al estudio de la implementación de estos procedimientos en aerolíneas, la Figura 5.19 muestra cuántas aeronaves por país cuentan con la habilitación para realizar procedimientos de aproximación LPV. En el gráfico se muestra que España queda en la mitad superior, con un total de 27 aeronaves habilitadas, lejos, no obstante, de Suiza, con un total de 89 aeronaves habilitadas. El total europeo es de 531 aeronaves habilitadas.

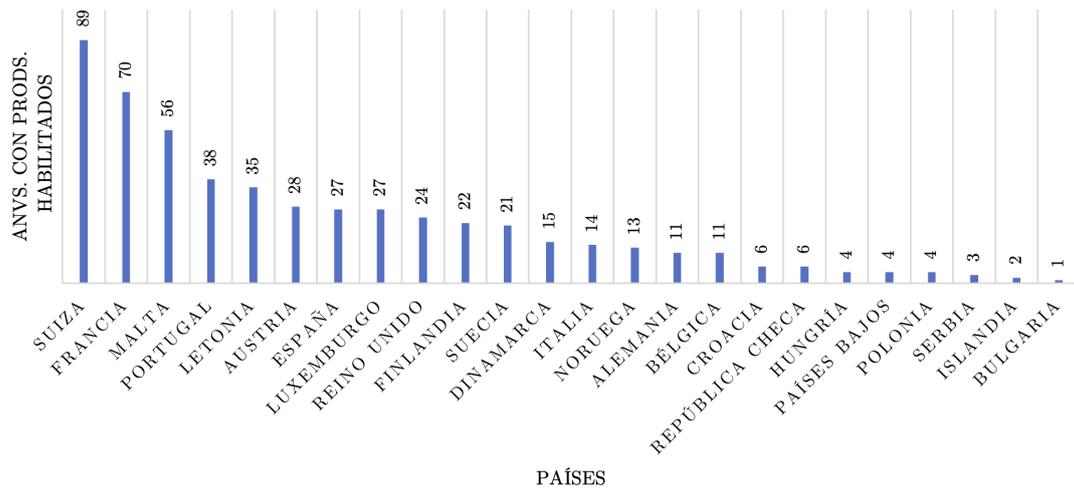


Figura 5.19: Aeronaves con habilitación para procedimientos LPV.

Por otra parte, se estudia el número de operadores aéreos que cuentan con habilitación para alguna de sus aeronaves. Se muestran los resultados en la Figura 5.20, en la que se muestra el porcentaje de operadores con alguna aeronave habilitada sobre el total de operadores del país. La media europea es del 5,5 %, una cifra muy baja.

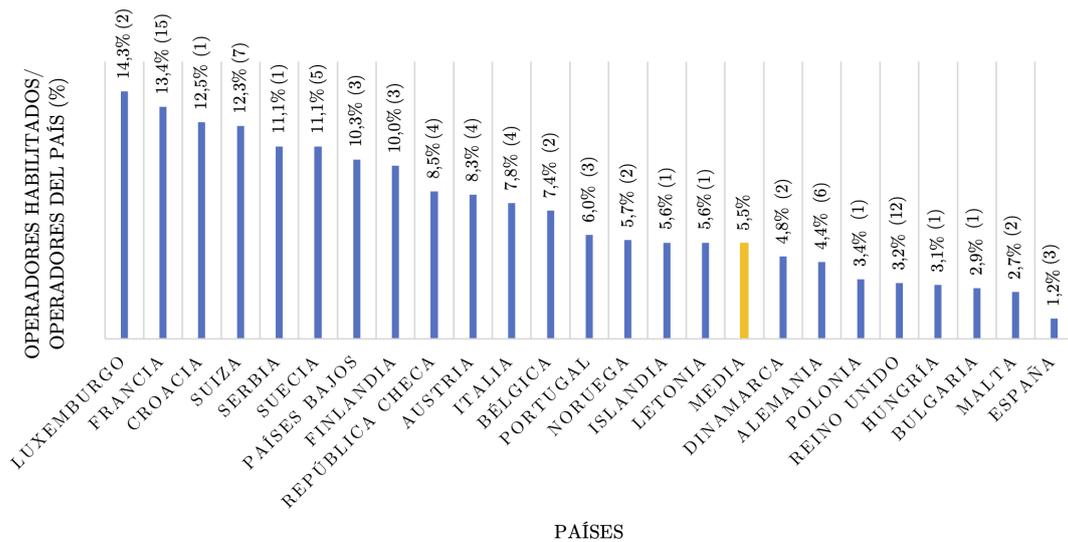


Figura 5.20: Porcentaje de operadores con alguna aeronave habilitada para procedimientos LPV.

El porcentaje se puede ver muy afectado por la existencia de operadores no dedicados a aviación civil (recreación, grabación de imágenes aéreas, entrenamiento...) o por la existencia de más o menos operadores, que depende del tamaño y desarrollo económico de cada país. Por ello, se muestra entre paréntesis el valor absoluto de operadores con habilitación para cada país. Este hecho explica que países como España, a pesar de tener tres operadores que cuentan con alguna aeronave habilitada para LPV, esté en última posición y tenga por delante a países como Noruega, que a pesar de tener mayor porcentaje, tiene menos operadores habilitados.

5.3.2. WAAS

5.3.2.1. Arquitectura

En este caso, los segmentos que presentan peculiaridades significativas también son el segmento espacial y el segmento tierra:

- **Segmento espacial:** inicialmente se componía de dos satélites GEO que se retiraron del servicio en julio de 2007. Por ello, en 2005 ya se habían lanzado dos satélites. En marzo de 2010 se lanzaba otro satélite. Con ello, en la actualidad, los GEO que componen el sistema WAAS son:
 - *Intelsat Galaxy 30*: PRN 135.
 - *Eutelsat 117 Wet (GEO5)*: PRN 131.
 - *SES 15 (GEO6)*: PRN 133.

Con estos tres satélites se obtiene cobertura para toda el área de servicio, que se compone de las zonas que se muestran en las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24. Las Zonas 1 y 2 son regiones continentales del país, incluyendo la primera 48 estados colindantes (*Contiguous United States (CONUS)*) y la segunda, Alaska. La Zona 3 son las islas de Hawái y la Zona 4 son las islas del Caribe. En todas las zonas se extiende el área de cobertura 55 km más allá de la línea de costa.

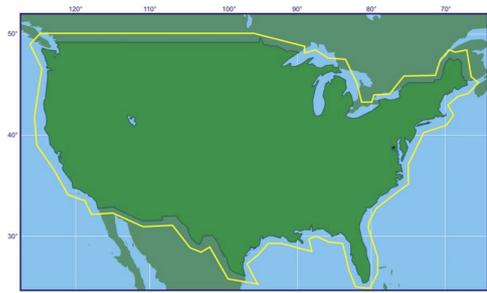


Figura 5.21: Área de cobertura de la Zona 1 de WAAS [25].

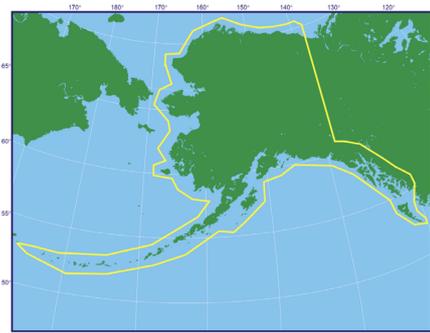


Figura 5.22: Área de cobertura de la Zona 2 de WAAS [25].



Figura 5.23: Área de cobertura de la Zona 3 de WAAS [25].



Figura 5.24: Área de cobertura de la Zona 4 de WAAS [25].

La Figura 5.25 muestra el área conjunta de cobertura del sistema WAAS.

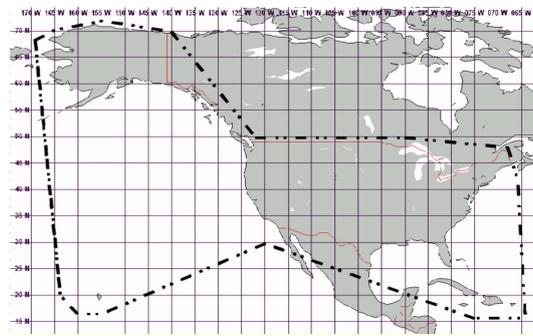


Figura 5.25: Área de cobertura de WAAS [25].

Los GEO transmiten el mensaje WAAS en la frecuencia L1 (1575,42 MHz), que se codificada de manera similar al código C/A. La señal L5 se utiliza ahora internamente para la corrección ionosférica, aunque en el futuro, esta transmitirá mensajes de corrección e integridad diseñados específicamente para usuarios de doble frecuencia (L1 y L5).

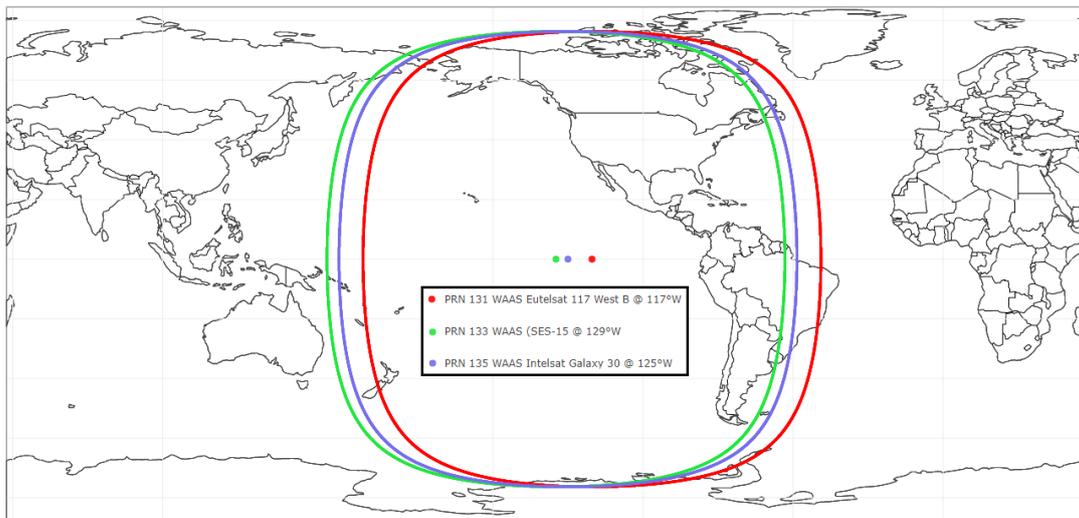


Figura 5.26: Huella de cobertura de los satélites GEO de WAAS [26].

Cabe destacar una diferencia respecto a EGNOS, pues en el caso de WAAS las huellas de cobertura de los satélites GEO, como se ve en la Figura 5.26, son prácticamente coincidentes y las tres cubren el área de cobertura. Esto implica que cuando algún satélite entre en mantenimiento o en caso de error, seguirá habiendo redundancia en toda el área de cobertura (Figura 5.25).

- **Segmento tierra:** el sistema WAAS se controla desde dos estaciones de trabajo en operaciones y mantenimiento (*Operations and Maintenance (OM)*) que se encuentran en el centro nacional de operaciones y control (*National Operations and Control Center (NOCC)*) y centro de control de operaciones del Pacífico (*Pacific Operations Control Center (POCC)*).

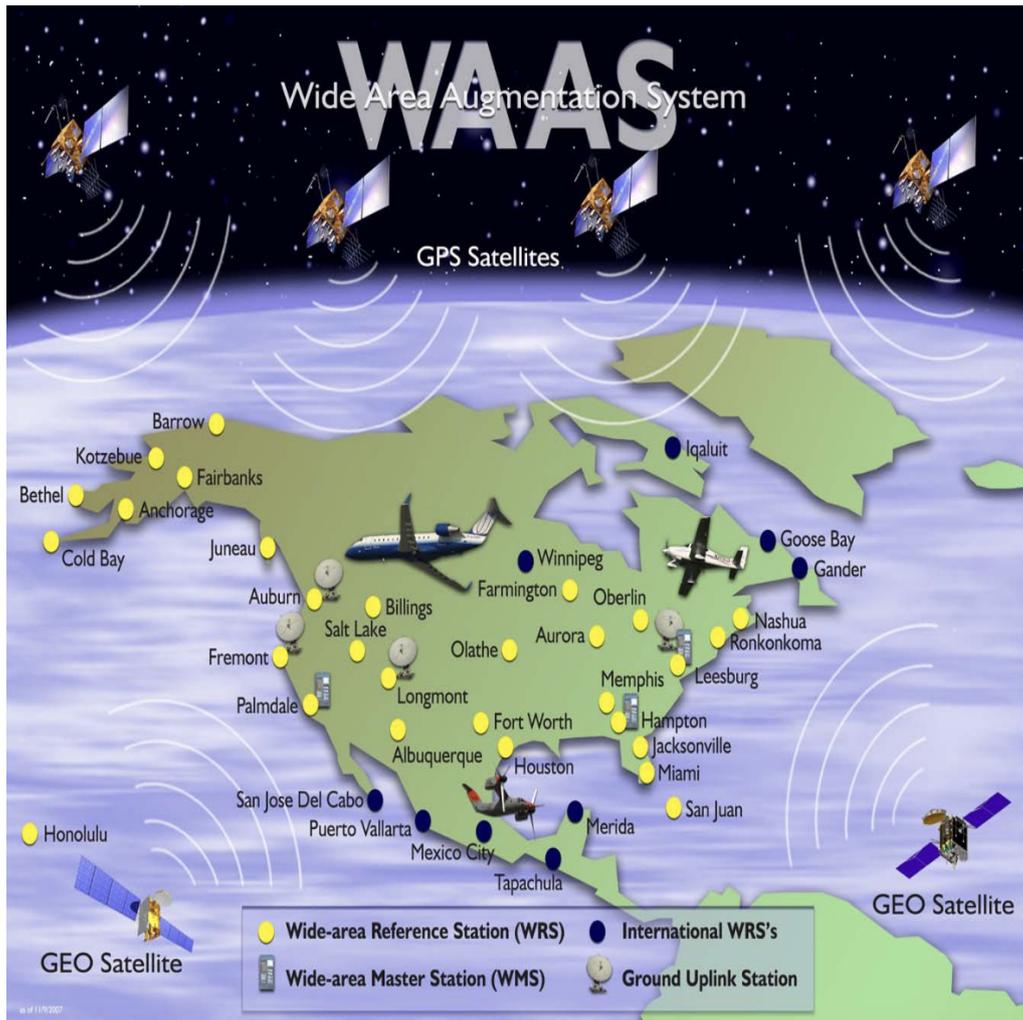


Figura 5.27: Segmento tierra del sistema WAAS [25].

Además, el segmento tierra se conforma de [25]:

- Estaciones de referencia de área amplia (*Wide-area Reference Station (WRS)*): hay un total de treinta y ocho estaciones, y cada una de ellas contiene tres equipos de referencia de área amplia (*Wide-area Reference Equipment (WRE)*). Estos equipos están al cargo de recopilar, preparar y enviar la información recogida de los satélites GEO a las WMS para su procesamiento.

- Red de comunicaciones terrestre (*Terrestrial Communications Network* (TCN)): es el enlace entre los diferentes componentes del segmento tierra. Garantiza la transmisión de información de forma correcta. Para ello consta de dos redes redundantes.
- Estaciones maestras de área amplia (*Wide-area Master Station* (WMS)): se trata de tres estaciones terrestres al cargo de las correcciones e integridad del sistema WAAS. A partir de los datos del WRE, se calculan correcciones de las efemérides y del reloj y se realizan correcciones ionosféricas. A continuación, las correcciones son enviadas a la correspondiente estación terrestre (*Ground Earth Station* (GES)).
- GES: junto a esta estación también se encuentran una o más estaciones de subida de datos al GEO (*Ground Uplink Station* (GUS)). Cada GEO se nutre de dos de estas últimas, encargadas de enviar el mensaje WAAS a los GEOs.

El segmento terrestre tiene las WRS, WMS y GUS ubicadas en las localizaciones mostradas en la Figura 5.27.

5.3.2.2. Servicios

El sistema WAAS no tiene división de servicios como sí lo tiene EGNOS. Esto no implica que no sea capaz de proporcionar todas las correcciones y servicios de mejora de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, necesarios para aviación civil.

5.3.2.3. Rendimiento

El rendimiento de la SIS de WAAS, de forma general, se atiende a los requisitos de la OACI, o los supera. Su rendimiento ha sido medido y analizado por la FAA durante todo el período en que ha estado en servicio.

En la Tabla 5.2 se muestra datos de las capacidades del sistema WAAS, basándose en el diseño del sistema y el análisis del rendimiento real.

Precisión		Integridad		Continuidad	Disponibilidad
Horizontal 95 %	Vertical 95 %	Integridad	Tiempo de alerta TTA		
1,6 m	1,6 m	$1 - 1 \cdot 10^{-7}$ / aproximación	6,2 s	$< 1 - 1 \cdot 10^{-6}$ por cada 15 s	Ver Figuras 5.28 y 5.29

Tabla 5.2: Valores de rendimiento de WAAS [25].

WAAS ofrece su nivel de servicio basándose en los procedimientos LPV-200, que son los más exigentes. No obstante, este nivel de servicio no está disponible en todas las zonas. Sí está disponible en todas un mínimo nivel de servicio, el cual se muestra en el receptor.

A continuación, se muestran los mapas de disponibilidad para los procedimientos más relevantes: LPV y LPV-200.

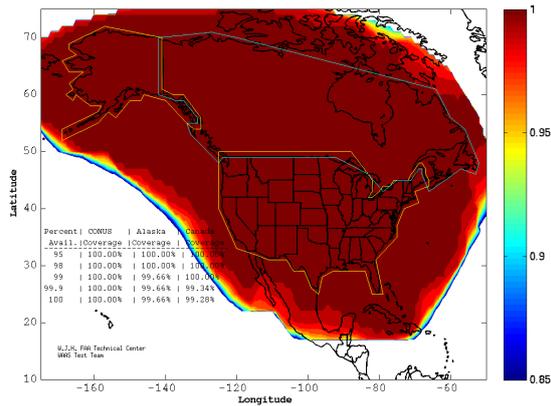


Figura 5.28: Disponibilidad de WAAS para dar soporte a procedimientos LPV [27].

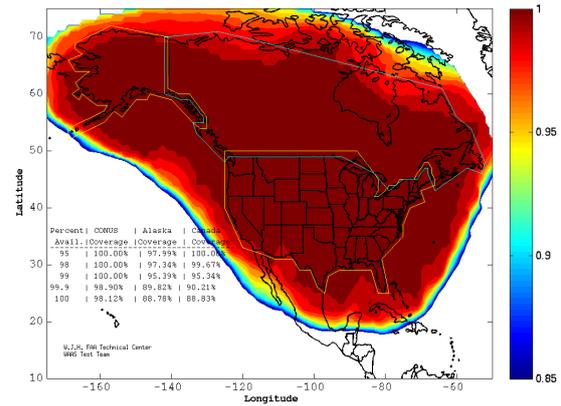


Figura 5.29: Disponibilidad de WAAS para dar soporte a procedimientos LPV-200 [27].

En la Figura 5.28 se muestra como, para LPV, el 100 % del área de los CONUS y Canadá cumple con el requisito de disponibilidad de la OACI, que es, según la Tabla 4.10, del 99%. Para el caso de Alaska (Zona 2), hay una pequeña porción del territorio, el 0,34 %, para la que no se cumple con los requisitos de disponibilidad. Las Zonas 3 y 4 (Hawái y el Caribe) quedan excluidas de la disponibilidad este nivel de servicio del sistema.

Por otra parte, en la Figura 5.29 se muestra como, para LPV-200, de nuevo, en el 100 % de los CONUS se cumple con los requisitos de la OACI. No ocurre así con Alaska y Canadá, que se quedan por debajo de la cobertura total. En ambos casos, poco más de un 4 % del territorio queda por cubrir. Hawái y el Caribe también son excluidas de la cobertura para LPV-200.

5.3.2.4. Integración

Para el caso americano se ha realizado un estudio muy similar al europeo, para poder realizar una comparación posterior. En este caso, los datos son más limitados y se utilizan las siguientes bases de datos (datos actuales a fecha de julio de 2023):

- **Aeropuertos con procedimientos operativos en EEUU:** se consideran las operaciones LPV activas, sin tener datos de las planificadas, y se distingue entre operaciones LPV-200 y el resto de LPV con mayores mínimos [99]. Por razones de simplicidad, para todos los cálculos, los datos del territorio *District of Columbia*, se han integrado con los datos para el estado de *Maryland*, que es el estado lo rodea.
- **Aeropuertos y sus códigos:** esta base de datos es la misma que se emplea para Europa, y, de nuevo, los *aeropuertos medianos* y *aeropuertos grandes* han sido considerados aeropuertos comerciales o militares (denominados comerciales, por simplicidad) y los *aeropuertos pequeños* son considerados aeródromos de diverso propósito (entrenamiento, vuelo privado de ultraligeros...).

En la Figura 5.30 se muestra, en porcentaje, qué estados son los que más operaciones (LPV de todo tipo) tienen activas. Se ha dividido el número de operaciones activas de cada estado entre el total de operaciones activas en EEUU, con lo que la suma de todos los porcentajes es el 100 %.

En la Figura 5.30 se puede observar que el estado con mayor número de procedimientos activos es Texas (7,8 %), seguido de Florida (4,6 %) e Illinois (3,8 %). En este caso, a comparación del europeo, se observa que los porcentajes son más bajos y están más repartidos, debido a un mayor número de estados que de países con procedimientos activos.

Al realizar el mismo estudio para procedimientos LPV-200, se observa un ranking similar, con distintos porcentajes. En la Figura 5.31 se ha dividido el número de operaciones LPV-200 activas de cada estado entre el total de operaciones LPV-200 activas en EEUU, con lo que la suma de todos los porcentajes es el 100 %.

A continuación, se procede a realizar un análisis de las operaciones LPV-200 activas por estado sobre el total de operaciones activas en cada estado. Los resultados se muestran en la Figura 5.32.

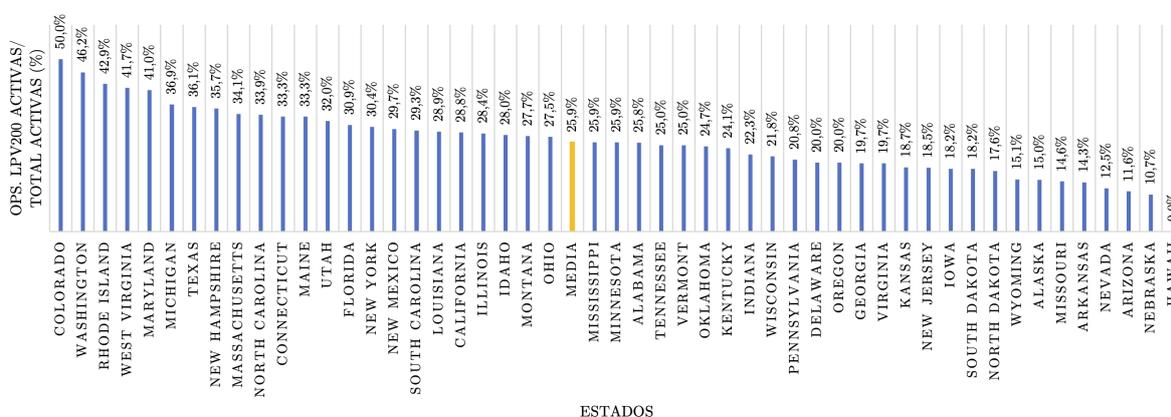


Figura 5.32: Operaciones LPV-200 sobre el total de operaciones activas.

En la Figura 5.32 se comprueba que en el mejor de los casos, en el estado de Colorado, tan solo se tiene un 50 % de procedimientos LPV-200, lo que supone que la otra mitad son procedimientos LPV con mayores mínimos. A diferencia de Europa, aquí, todos los estados con procedimientos, cuentan con al menos un 10,7 % de procedimientos LPV-200, pues Hawái no entra en el cómputo al no tener ningún tipo de procedimiento LPV. Aun con esta ventaja, su media de operaciones LPV-200 sobre las operaciones activas cae hasta el 25,9 %, casi la mitad de la media europea.

Se comprueba también qué porcentaje de los aeropuertos que emplean procedimientos basados en LPV, cuentan con procedimientos LPV-200. En la Figura 5.33 se observa que ocurre como antes, pues no existen ratios tan altos de integración en ningún estado, pero sí hay mínimamente un 13,6 % de aeropuertos con procedimientos LPV que también cuentan con LPV-200. La media de 31,27 %, aunque un poco superior a la anterior, sigue quedándose por detrás del 50 % de la media europea.

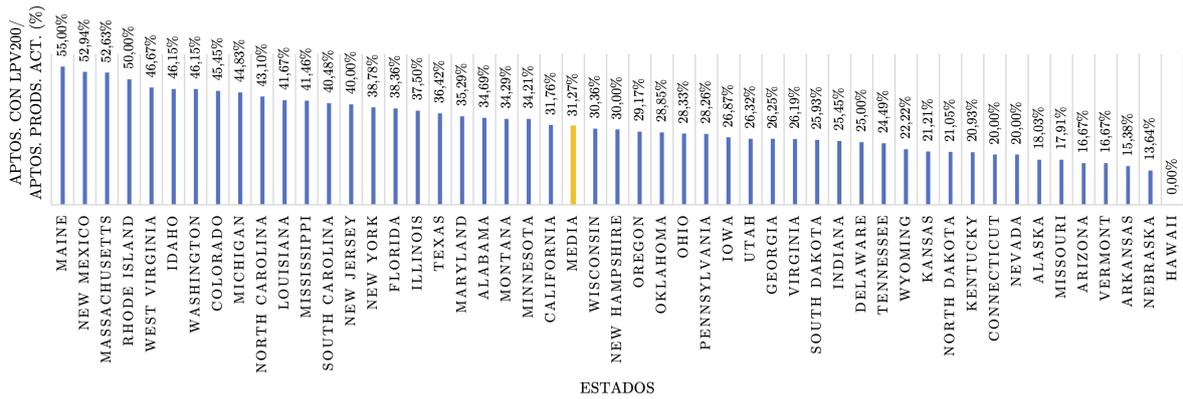


Figura 5.33: Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV activos.

Se pasa a comparar los aeropuertos que tienen algún procedimiento LPV o LPV-200 activo sobre el total de aeropuertos comerciales y militares (denominados comerciales por simplicidad) de cada estado. Se muestran los resultados en las Figuras 5.34 y 5.35.

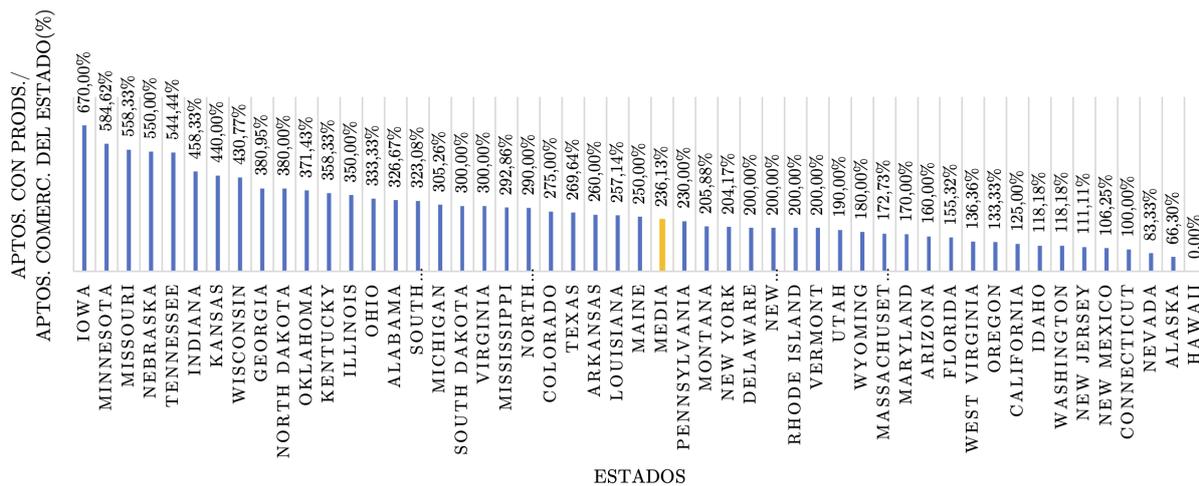


Figura 5.34: Aeropuertos con procedimientos LPV activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada estado.

Se observa que hay estados como Iowa o Minnesota, entre otros, en los que para el caso de procedimientos LPV se llega a valores de integración del 670%. Esto significa que en estos estados también hay aeródromos de menor tamaño, que se han excluido del cómputo, que también cuentan con habilitaciones para este tipo de procedimientos.

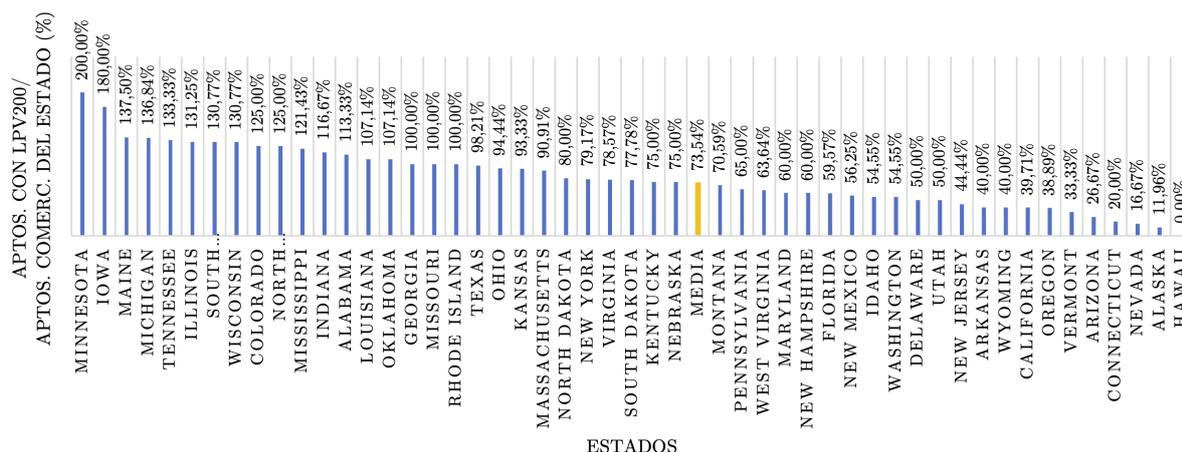


Figura 5.35: Aeropuertos con procedimientos LPV-200 activos sobre el total de aeropuertos comerciales de cada estado.

Por lo que a medias respecta, en este caso Estados Unidos desbanca a Europa con una media del 236,1 % de los aeropuertos comerciales en los que hay habilitado al menos un procedimiento LPV y una media del 73,54 % de los aeropuertos comerciales en los que hay habilitado al menos un procedimiento LPV-200, frente al 47,18 % y el 24 % europeo.

Si se tiene en cuenta el total de los aeródromos y aeropuertos (comerciales, militares y otros) de cada país (para el caso de Europa) o de cada estado (para el caso de Estados Unidos), se tiene lo mostrado en la Tabla 5.3.

	Media europea	Media estadounidense
Aptos. con prods LPV sobre total de aeropuertos de cada país/estado	7,42 %	14,05 %
Aptos. con prods LPV-200 sobre total de aeropuertos de cada país/estado	3,75 %	4,38 %

Tabla 5.3: Medias europea y estadounidense de aeropuertos con procedimientos LPV y LPV-200 sobre el total de aeropuertos de cada país/estado.

Considerando todos los aeródromos y aeropuertos (comerciales o no), se observa en la Tabla 5.3, que Estados Unidos sigue ganando a Europa, aunque lo hace con mayor ventaja para el caso de las operaciones LPV. Esto es indicativo de que, en proporción, las operaciones que más están implantadas en Europa son las LPV-200.

5.3.3. Comparativa integración EGNOS y WAAS

Como resumen, se pueden observar los diferentes resultados en las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6.

EGNOS		WAAS	
LPV	LPV-200	LPV	LPV-200
Francia (23,3 %)	Francia (29,6 %)	Texas (7,8 %)	Texas (10,8 %)

Tabla 5.4: País/estado con mayor porcentaje de procedimientos.

En la Tabla 5.4 se observa que los porcentajes en EEUU son menores debido a que hay más estados en EEUU que países en Europa con procedimientos activos, y, por tanto, los procedimientos se ven más repartidos.

	EGNOS	WAAS
Media de procedimientos LPV-200 sobre el total de procedimientos LPV activos	50,2 %	25,9 %
Media de aeropuertos con procedimientos LPV-200 sobre el total de aeropuertos con procedimientos LPV activos	50,8 %	31,3 %

Tabla 5.5: Medias relativas a procedimientos LPV-200.

En la Tabla 5.5 se observa que en Europa, la mitad de los procedimientos LPV, lo son LPV-200, mientras que en EEUU solo son un cuarto de ellos tienen un mínimo de 200 pies. También ocurre que en Europa hay un mayor número de aeropuertos que cuentan con procedimientos LPV-200 de entre todos los que tienen algún procedimiento LPV.

EGNOS		WAAS	
LPV	LPV-200	LPV	LPV-200
47,1 %	24 %	236,1 %	73,5 %

Tabla 5.6: Media de aeropuertos con el procedimiento indicado sobre total de aeropuertos comerciales del país/estado.

Por lo que a número de procedimientos respecta, la Tabla 5.6 permite llegar a la conclusión de que Estados Unidos tiene un nivel de integración de WAAS mayor al que Europa tiene de EGNOS. No obstante, para el caso de Europa, sí se conocen los planes de implementación de aproximaciones LPV en más aeropuertos.

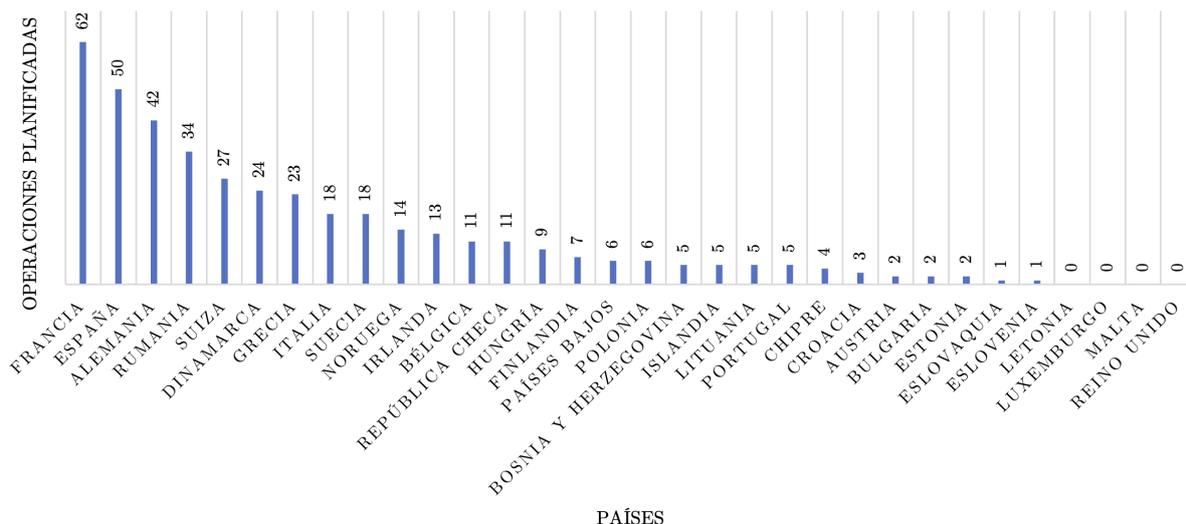


Figura 5.36: Procedimientos LPV planificados en Europa.

En la Figura 5.36 se muestra el número de procedimientos LPV que están planificados en Europa y están pendientes de implementar. En total, suman 410 procedimientos que se sumarán a los 828 ya activos. Esto supondrá un aumento del 200%.

Por tanto, es solo cuestión de tiempo que la integración en Europa llegue a los niveles de la de Estados Unidos. Por lo pronto, los 410 planes para nuevos procedimientos en Europa, hacen suponer que el porcentaje de aeropuertos equipados irá convergiendo a un valor similar para las dos potencias económicas.

No obstante, el proceso de validación de un nuevo procedimiento es complejo y requiere de cierto tiempo para la recopilación de datos. A continuación, en el Capítulo 6 se profundiza en este tema.

Capítulo 6

Validación

La OACI recoge en el segundo volumen de su Documento 8168 (PANS-OPS) [100] la guía para la construcción de procedimientos, en la que se especifica que una parte importante en la creación de un nuevo procedimiento es la garantía de calidad (*Quality Assurance*), para la que la OACI elabora el Documento 9906.

Para el caso de la elaboración de un procedimiento por instrumentos (IFP), como es un aterrizaje LPV-200, se sigue lo denominado como “proceso IFP” que consta de tres subprocesos: la adquisición de datos, el diseño y la promulgación del procedimiento. El subproceso de diseño es el que incluye la fase de validación, como último paso antes de publicar el procedimiento.

La validación es la que garantizará la calidad del proceso de diseño del procedimiento. Por tanto, su propósito es la verificación de datos de navegación, obstáculos y aeronavegabilidad del procedimiento. Comúnmente, la validación se compone de una fase en tierra y otra de vuelos.

Según la OACI, la validación en tierra debe llevarse a cabo por una persona experta en diseño de procedimientos y técnicas de validación. Su realización pretende detectar errores de criterio y documentación y evaluar en tierra, en la medida de lo posible, los elementos que se vayan a evaluar en vuelo para corregir errores de forma previa al vuelo.

Tanto la validación en tierra como la de vuelo se incluyen en un programa periódico de revisión de garantía de calidad, para asegurarse que los procedimientos siguen cumpliendo con los requisitos. La validación en vuelo será llevada a cabo por un piloto experto y cualificado. Se verificarán datos de obstáculos, datos de navegación, diseño del procedimiento, infraestructura, aeronavegabilidad, cartas, visibilidad y otros factores operacionales. Se realiza en dos fases: evaluación en simulador y evaluación en vuelo.

6.1. Proceso de validación

A continuación, se realiza una parte del proceso de validación para un procedimiento LPV-200 en el aeropuerto de Ibiza (LEIB). Se escoge este aeropuerto por ser uno de los que aún no tiene un procedimiento LPV habilitado. Además, de acuerdo con los datos empleados en la Subsección 5.3.1 [24], este aeropuerto tiene planes de implementación de procedimientos LPV-200 para sus dos pistas (06 y 24) antes de finales de 2024.

Ibiza es una importante puerta de entrada del turismo en España, situándose como el octavo aeropuerto español con más número de pasajeros en 2022, con un total de más de ocho millones de pasajeros [101]. Por ello, este aeropuerto requiere de procedimientos mejorados, que le permitan aumentar su capacidad de forma segura.

La parte del proceso que se muestra es relativa a la evaluación de los parámetros de calidad que un procedimiento como el que se pretende validar requiere. Otras fases de la validación, como la revisión de cartas o la validación en vuelo o simulador, son omitidas aquí. Se realiza, pues, una validación en tierra que recopila datos a corto y largo plazo.

Cabe destacar que lo que se realiza es a continuación es una aproximación. Para la validación de un procedimiento LPV-200 se requiere del despliegue de receptores GNSS en los alrededores del aeropuerto, que permitan la recogida de datos a corto plazo. Dado que se carece de dicha infraestructura, se va a hacer uso de los datos recopilados por una de las RIMS de EGNOS ubicada en Palma de Mallorca y de una estación ERGNSS del IGN ubicada en Ibiza.

Conociendo las coordenadas de las estaciones RIMS y ERGNSS [102, 103] y las del ARP de LEIB (ubicado entre ambas cabeceras de pista) [104], se puede medir que hay 7,85 km entre el aeropuerto y la ERGNSS IBIZ y 140,33 km entre el aeropuerto y la RIMS PDM. Por aproximación, se puede suponer que los datos de observación, navegación y corrección de estas estaciones van a ser similares a los que se obtendrían con el despliegue de la infraestructura en la pista del aeropuerto.

6.2. Validación a largo plazo

Como primer paso, se pretende verificar que la señal recibida en Ibiza (LEIB) cumpla con los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad en el largo plazo. Dichos requisitos son mostrados en la Tabla 4.10 y se han extraído los específicos para operaciones LPV en la Tabla 6.1. Para realizar la verificación se utilizan datos de los últimos seis meses, extraídos de los reportes mensuales de la *European Satellite Services Provider* (ESSP) [105]. A fecha de agosto de 2023, los últimos seis reportes disponibles son los que van de febrero a julio de 2023.

Operación	Precisión horizontal (95 %)	Precisión vertical (95 %)	Integridad	Tiempo de alerta	Continuidad	Disponibilidad
Aproximación CAT I	16 m	4 a 6 m	$1 - 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximación	6 s	$1 - 8 \cdot 10^{-6}$ / 15 s	0,99 a 0,99999

Tabla 6.1: Requisitos de rendimientos para operaciones LPV. [42]

6.2.1. Disponibilidad

Se dividirá el análisis de la disponibilidad en el análisis de la disponibilidad de los satélites geostacionarios que ofrecen el servicio EGNOS (disponibilidad SIS) y la disponibilidad de la operación de aproximación que se analiza.

Respecto a la disponibilidad SIS, en la Tabla 6.2 se muestra que durante los últimos seis meses ha habido en todo momento, al menos, un satélite GEO disponible. Tomando en cuenta las Figuras 5.2 y 5.3, en las que se muestra el área de cobertura de cada uno de los satélites, el aeropuerto de Ibiza siempre ha estado cubierto por al menos un GEO.

Disponibilidad (%)	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07
PRN123	99,93	100	99,99	99,99	—	—
PRN126	—	—	—	99,99	99,99	99,99
PRN136	99,95	99,99	99,99	99,99	99,96	99,99
Al menos un GEO de EGNOS disponible	100	100	100	100	100	100

Tabla 6.2: Disponibilidad de EGNOS SIS en los GEO [43, 44].

En cuanto a la disponibilidad de operación, se mide el porcentaje de épocas por mes en el que el nivel de protección ha estado por debajo del límite de alerta.

Se tiene en cuenta que el límite de alerta para aproximaciones LPV-200 es de 40 m en horizontal y 35 m en vertical. Por tanto, para que se cumpla el requisito, el nivel de protección PL tanto horizontal (HPL), como vertical (VPL), debe ser menor al límite de alerta (AL) horizontal (HAL) y vertical (VAL) respectivamente.

En la Tabla 6.3 se muestran los datos de la disponibilidad para operaciones LPV-200, extraídos de los mapas proporcionados en los reportes mensuales de la ESSP.

	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07
Disponibilidad (%)	≥ 99	≥ 95	≥ 99	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$

Tabla 6.3: Disponibilidad de operaciones LPV-200 [43, 44, 45, 46, 47, 48].

De acuerdo con los requisitos de OACI (Tabla 6.1), se requiere al menos un 99% de disponibilidad. En marzo se obtuvo un mínimo del 95%, lejos de cumplir con el objetivo. Esta degradación excesiva del servicio fue debida, tal y como indica la propia ESSP en la nota de servicio 25 [106], al ciclo solar actual. Se especifica que las consecuencias más notorias han sido durante el primer cuatrimestre de 2023, y así queda reflejado en los datos mostrados anteriormente. No obstante, este no es el rendimiento habitual y nominal del sistema, como se puede comprobar en el resto de meses y en reportes mensuales de períodos anteriores.

La degradación en el rendimiento es, por tanto, debida a cambios en la ionosfera y no se puede predecir con facilidad ni establecer con precisión su evolución. Se prevé aumentar la robustez con las mejoras que van a introducirse en el último cuatrimestre de 2023. Pero los efectos de los ciclos solares serán completamente eliminados una vez se implemente EGNOS V3 para frecuencia doble.

En definitiva, se puede concluir que el requisito de disponibilidad sí se cumple, por ser nominalmente mayor al 99%. La excepción a la regla no implica que no se pueda operar, pues es debido a factores ionosféricos, que se eliminarán en futuras versiones del sistema. Además, en la actualidad la ESSP se encarga de mantener debidamente informados a todos los usuarios afectados a través de los canales y mecanismos correspondientes.

6.2.2. Continuidad

El análisis de la continuidad se define por el riesgo de continuidad en la operación. Este se obtiene dividiendo el número de eventos de continuidad en 15 segundos (para el caso de LPV-200) entre el número de muestras con soluciones de navegación válidas. Un evento ocurre cuando el sistema está disponible al inicio de la operación, pero deja de estarlo en algún momento a lo largo de los siguientes 15 segundos. En la Tabla 6.4 aparece reflejado el riesgo de continuidad a lo largo de los últimos 6 meses en Ibiza (LEIB).

	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07
Riesgo de continuidad (/15s)	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$

Tabla 6.4: Riesgo de continuidad en operaciones LPV-200 [43, 44, 45, 46, 47, 48].

OACI exige para las aproximaciones de tipo LPV-200 (CAT I) que el valor del riesgo de continuidad esté sea como máximo de $1 \cdot 10^{-6}$ (ver Tabla 6.1). Con EGNOS, este riesgo de continuidad es mayor, y, por tanto, no se cumple esta condición. No obstante, como se comentaba en la Subsección 5.3.1.3, riesgos de hasta $\leq 1 \cdot 10^{-3}$ se consideran tolerables para iniciar el uso de EGNOS en aviación civil. Por tanto, los aeropuertos para los que se certifica la aproximación LPV-200 con SBAS, asumen el riesgo de no cumplir la condición.

6.2.3. Precisión

Los valores de precisión se obtienen de los datos recogidos por las RIMS. Para ello, se hará uso de los datos de la RIMS de Palma de Mallorca (PDM), como se explicaba anteriormente.

En la Tabla 6.5 se reflejan los valores de precisión horizontal (HSNE) y vertical (VSNE) y porcentaje de muestras en las que el servicio para la aproximación LPV-200 estaba disponible.

	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07
HNSE 95 % (m)	1,1	1,2	1,1	1	1	1
VNSE 95 % (m)	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
% de muestras con el servicio LPV-200 disponible	100 %	100 %	99,9 %	100 %	100 %	100 %

Tabla 6.5: Valores de precisión en la RIMS PDM [43, 44, 45, 46, 47, 48].

La OACI exige un error máximo de 16 m en horizontal y entre 4 y 6 m en vertical (ver Tabla 6.1). Con los valores de la Tabla 6.5 se observa que estos requisitos se cumplen.

6.2.4. Integridad

La integridad se analiza a partir de los eventos de integridad producidos y a través del Índice de Seguridad (SI). El Índice de Seguridad se dividirá en HSI (Índice de Seguridad Horizontal) y VSI (Índice de Seguridad Vertical). En la Tabla 6.6 aparecen reflejados los valores máximos tomados a lo largo de cada mes de los índices HSI y VSI.

	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07
HSI	0,35	0,54	0,37	0,34	0,32	0,39
VSI	0,37	0,38	0,38	0,34	0,33	0,37

Tabla 6.6: Valores de los índices de seguridad vertical y horizontal [43, 44, 45, 46, 47, 48].

Se observa en la Tabla 6.6 que en todos los meses el Índice de Seguridad tanto horizontal como vertical tiene un valor máximo inferior a 1. Por tanto, no se han producido eventos de integridad. Además, el tiempo de alerta es de 6 s, como exige OACI. Por tanto, se cumple el requisito de integridad.

6.2.5. Conclusión largo plazo

Por tanto, en esta primera revisión de requisitos a largo plazo, se concluye que el aeropuerto de Ibiza (LEIB) podría certificarse para aproximaciones LPV-200 con sistema de aumentación satelital SBAS si se asume el riesgo de continuidad. Es decir, el aeropuerto puede escoger usar este sistema, siendo conocedor de que no se cumple el requisito de continuidad. Por ello, se procede a la validación a corto plazo.

6.3. Validación a corto plazo

La validación a corto plazo es el paso siguiente, en el que se realiza un análisis exhaustivo sobre el terreno, es decir, en el mismo lugar en el que se pretenden llevar a cabo las operaciones PBN. El análisis debe tener una duración mínima de 36 horas.

Se ha visto en el análisis a largo plazo que el servicio de EGNOS, especialmente su continuidad y disponibilidad, se ve afectado debido al ciclo solar. Concretamente, en marzo, a causa del comportamiento ionosférico, el rendimiento distaba mucho del que es el rendimiento nominal del sistema.

Para realizar el análisis, por tanto, se escogen tres días de julio (6, 7 y 8), mes en el que el rendimiento es más similar al nominal. Sería irrelevante intentarlo en un mes como marzo, pues, como se comentaba antes, ya se trabaja en la supresión de los efectos de los ciclos solares en el servicio [106].

La validación se realiza a través del software *PEGASUS* de EUROCONTROL, que presenta diferentes módulos de procesamiento.

6.3.1. Recopilación y preprocesado de datos

El análisis a corto plazo requiere de la recopilación de datos de diversas fuentes. Se descargan en formato RINEX para cada uno de los días, que son los días 187, 188 y 189 del año.

De la página de descargas del IGN [107], se obtienen los ficheros de navegación y observación para la estación ERGNSS de Ibiza: ERGNSS IBIZ. Se trata de ficheros con formato RINEX 3.04. Ambos tipos de fichero están comprimidos en formato `.gz`, por lo que el primer paso es descomprimirlos.

Para las correcciones SBAS, se han obtenido los datos en formato RINEX 2.11 del servicio de EDAS de EGNOS, que permite el acceso a datos históricos. Este servicio, al que se ha tenido que solicitar acceso, permite la descarga de ficheros diarios, que también están comprimidos, en formato `.Z`. Tienen un nombre de la forma `brdc1870.23B.Z`, que indica que son los ficheros de corrección (B) para el día 187 de 2023 (1870.23). De nuevo, estos ficheros se han descomprimido como paso inicial.

El IGN recopila datos de navegación de GPS, GLONASS y Galileo, pero los archivos de navegación empleados son los que contienen datos de la efemérides GPS para cada hora. Son los que tienen nombre de la forma `IBIZ00ESP_R_20231870000_01H_GN.rnx`, que indica que la estación es la de Ibiza (IBIZ), en España (ESP), el día 187 de 2023 (2023187), para la hora 00 y minuto 00 (0000), en incrementos de una hora (`_01H`). Además, indica que se recopilan datos de navegación (N) para GPS (G) (`_GN`).

Los archivos de observación elegidos son los que contienen observaciones con una frecuencia de un segundo, separados de hora en hora. Tienen un nombre de la forma `IBIZ00ESP_R_20231870000_01H_01S_MO.crx`, que es similar al anterior, pero además, se indica que las mediciones son cada segundo (`_01S`). Ahora se especifica que se recopilan datos de observación (O) para múltiples constelaciones (M) (`_MO`). Aun tras la descompresión inicial (de formato `.gz`), el formato de estos ficheros es `.crx`, que es otra forma de compresión. Por tanto, se requiere de mayor preproceso. Usando el software *Hatanaka*, se pueden convertir los ficheros a `.rnx`. El proceso consiste en incluir los ficheros `.crx` en la carpeta `bin` del programa y a continuación, ejecutar el comando `crx2rnx` desde la línea de comandos, como se muestra en la Figura 6.1.

```
PS Microsoft.PowerShell.Core\FileSystem:~\Mac\Home\Desktop\HATANAKA\bin>
.\crx2rnx IBIZ00ESP_R_20231870000_01H_01S_MO.crx
```

Figura 6.1: Proceso de descompresión `.crx` a `.rnx`.

Tras el preproceso, se tiene un total de 147 ficheros: 24 de navegación, 24 de observación y 1 de correcciones para cada día. El siguiente paso será concatenar los 24 ficheros de navegación y los 24 de observación de cada día para obtener un solo fichero diario de cada tipo. Se realiza mediante un script en *Matlab* que mantiene el encabezado del primer archivo (hora 0) y concatena los datos de los siguientes. Posteriormente, para el caso de los ficheros de observación, se ha cambiado manualmente la hora de la última observación, de forma que quedaba reflejado que las observaciones se daban entre las 00:00:00 y las 23:59:59.

Ahora se tienen tres ficheros por día, pero con distintas nomenclaturas. Con el fin de unificarlas, se nombran en formato RINEX 2.11, es decir, `[ESTACION4] [DDD] [S] . [AA] [T]`. La estación es Ibiza (`[ESTACION4]` : IBIZ), el día va del 187 al 189 (`[DDD]` : 187, `[DDD]` : 188, `[DDD]` : 189),

la secuencia es igual a 0, que indica que se trata de un archivo diario ([S]: 0), el año [AA]: 23 y el tipo será [T]: b (correcciones), [T]: n (navegación) o [T]: o (observación). Por tanto, quedan los archivos mostrados en la Figura 6.2.

Nombre		
 IBIZ1870.23b	 IBIZ1880.23b	 IBIZ1890.23b
 IBIZ1870.23n	 IBIZ1880.23n	 IBIZ1890.23n
 IBIZ1870.23o	 IBIZ1880.23o	 IBIZ1890.23o

Figura 6.2: Archivos a analizar.

6.3.2. Procesado de datos con *PEGASUS*

El procesado de datos se realiza con el software *PEGASUS*, usando tres programas diferentes: *Convertor*, *GNSS.Solution* y *M-File Runner*. Con estos programas se realiza el análisis de precisión e integridad solamente, pues *PEGASUS* presenta ciertos inconvenientes a la hora de mostrar los resultados a corto plazo para disponibilidad y continuidad. Estos últimos dos requisitos se comprueban verificando los datos históricos de la web de EGNOS [28, 29].

Para el análisis con *PEGASUS*, el primer paso consiste en introducir los ficheros de observación (terminados en .23o) en el programa *Convertor*. Este programa hace recuento de rangos y efemérides de las constelaciones GPS y Galileo y da como resultado un fichero de extensión .rng, que será introducido en el siguiente programa.

La interfaz del programa puede verse en la Figura 6.3, en la que también se ven las opciones seleccionadas. Se especifica que el receptor trabaja en formato RINEX y que se desea el modo de corrección SBAS Mode 0, para realizar el procesado del mensaje tipo 0 sin copiar su contenido en un mensaje tipo 2 [108]. También se añaden manualmente los *Leap Seconds*, que son los segundos de diferencia entre el tiempo UTC y el tiempo GPS.

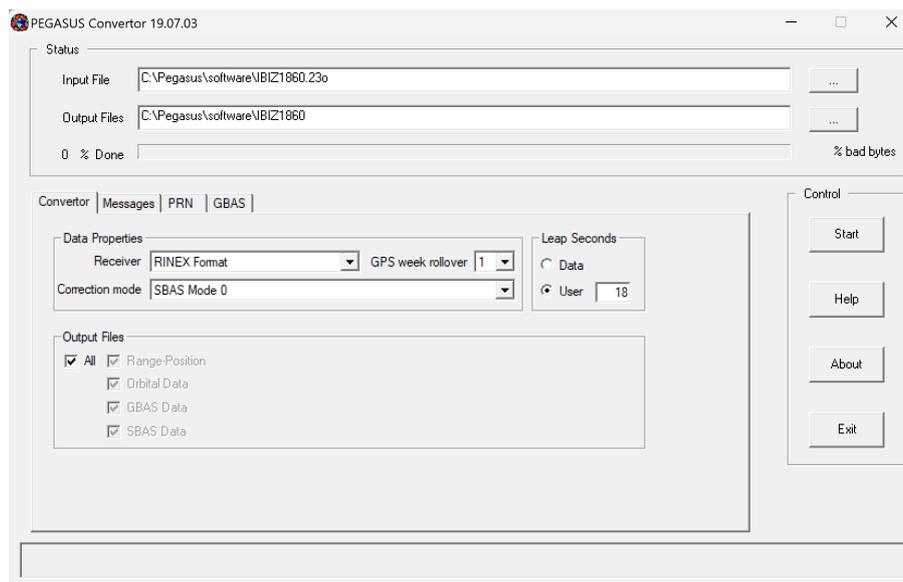


Figura 6.3: Interfaz del programa *Convertor* de *PEGASUS*.

A continuación se introducen en el programa *GNSS_Solution* los ficheros *.rng* generados. En la Figura 6.4 se muestra la interfaz del programa y las opciones que han sido seleccionadas.

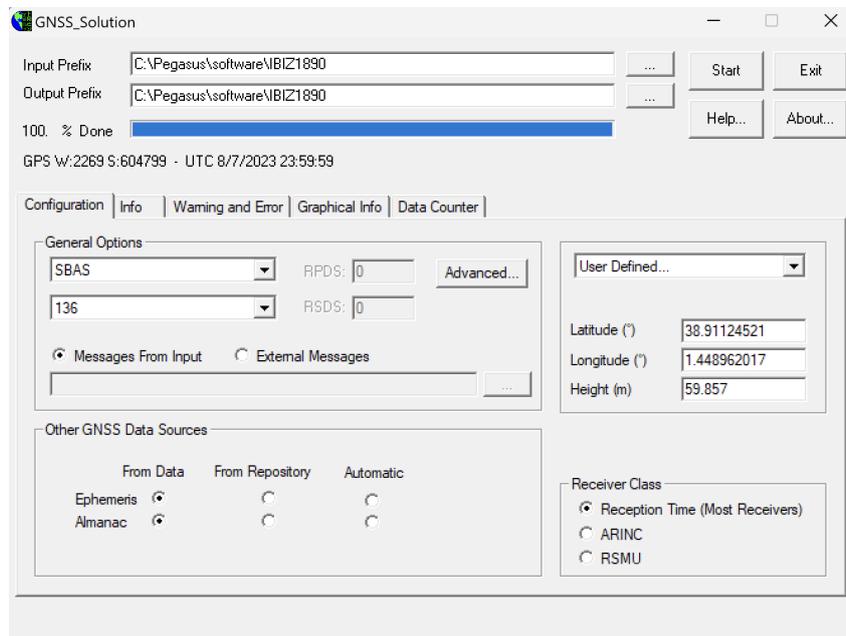


Figura 6.4: Interfaz del programa *GNSS_Solution* de *PEGASUS*.

Se muestra que del sistema SBAS se ha seleccionado el satélite con PRN 136, que es, según las Figuras 5.2 y 5.3, el de latitud más similar a la isla de Ibiza. Se han introducido, además, las coordenadas de la estación ERGNSS de Ibiza, las cuales han sido extraídas del IGN [109]. Este programa da como resultado ficheros de extensión *_sol.mif*.

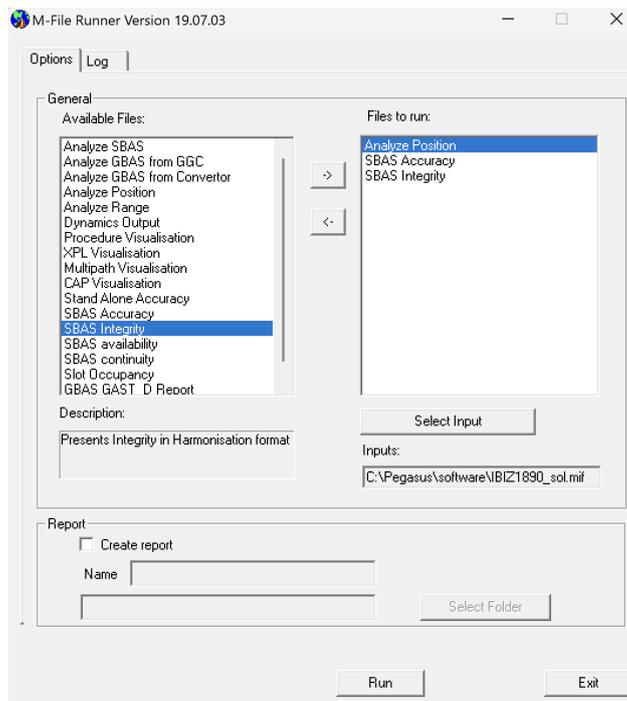


Figura 6.5: Interfaz del programa *M-File Runner* de *PEGASUS*.

Los ficheros `_sol.mif` son introducidos en el programa *M-File Runner*, el cual tiene la interfaz que se muestra en la Figura 6.5. Este es el encargado de ofrecer diversos archivos `.xml` como resultado, en los que se incluyen datos de precisión e integridad. Así mismo ofrece diagramas de Stanford y otras gráficas que van a ser presentadas a continuación.

6.3.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados. Estos se ofrecen para la estación ERGNSS IBIZ para el caso de precisión e integridad. En el caso de disponibilidad y continuidad, se obtienen los resultados de la web de EGNOS [28, 29].

6.3.3.1. Precisión

En la Tabla 6.7 se muestran los resultados de precisión horizontal y vertical (HNSE y VNSE) para el servicio LPV-200, tomando 86039 muestras diarias.

		06/07/23	07/07/23	08/07/23
HNSE	Media (m)	1,42204	1,34374	1,19019
	RMS (m)	1,46143	1,37933	1,22888
VNSE	Media (m)	0,597894	0,506214	0,562433
	RMS (m)	0,785831	0,644065	0,716447

Tabla 6.7: Valores de precisión horizontal y vertical.

Revisando las exigencias de la OACI, reflejadas en la Tabla 6.1, se comprueba que la precisión ofrecida es suficiente, pues se mantiene en los límites de 16 y 4 metros respectivamente.

6.3.3.2. Integridad

En la Tabla 6.8 se muestran los índices de seguridad horizontal y vertical (HSI y VSI) para el servicio LPV-200, tomando 86039 muestras diarias.

		06/07/23	07/07/23	08/07/23
HSI	Media (m)	0,165387	0,159238	0,13755
	RMS (m)	0,170015	0,163957	0,143596
VSI	Media (m)	0,0438611	0,0383024	0,0417981
	RMS (m)	0,0566835	0,0486226	0,0531537

Tabla 6.8: Valores del índice de seguridad horizontal y vertical.

Se observa que la media de los índices de seguridad queda lejos de superar la unidad. Además, viendo las Figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se comprueba que en ningún momento se supera la unidad. Teniendo en cuenta que el *índice de seguridad* es el cociente del error del sistema de navegación entre el nivel de protección, se puede confirmar que en ningún momento el error del sistema fue mayor al nivel de protección, y, por tanto, en ningún momento se ofreció información

engañoso. También puede observarse en los Diagramas de Stanford (Figuras 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17) que las regiones de debajo de la diagonal (que indican que el sistema ofrece información engañosa) están vacías.

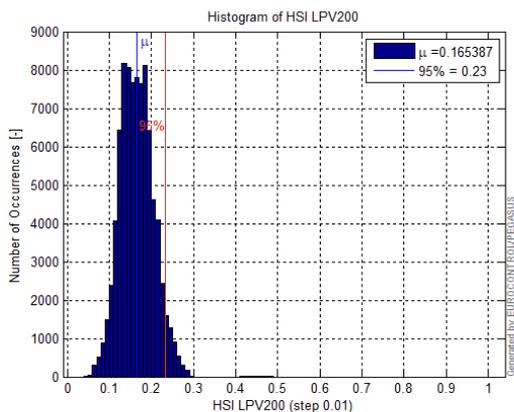


Figura 6.6: Índice de seguridad horizontal para el día 06/07/23.

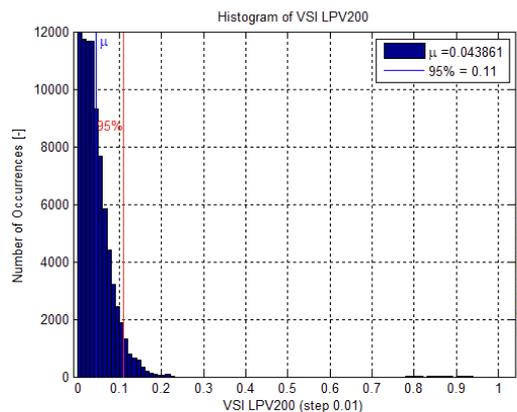


Figura 6.7: Índice de seguridad vertical para el día 06/07/23.

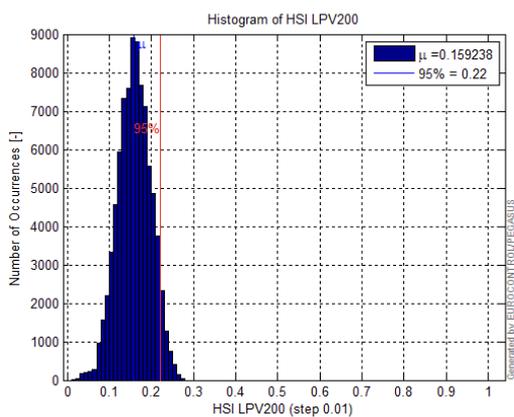


Figura 6.8: Índice de seguridad horizontal para el día 07/07/23.

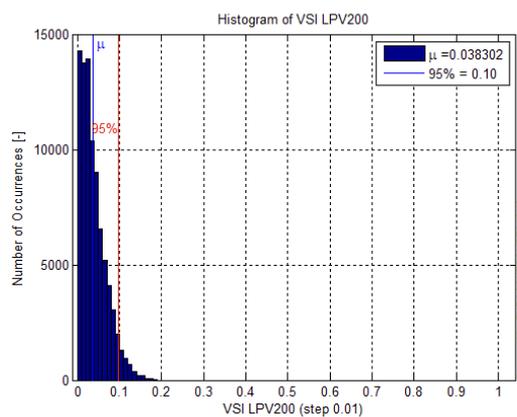


Figura 6.9: Índice de seguridad vertical para el día 07/07/23.

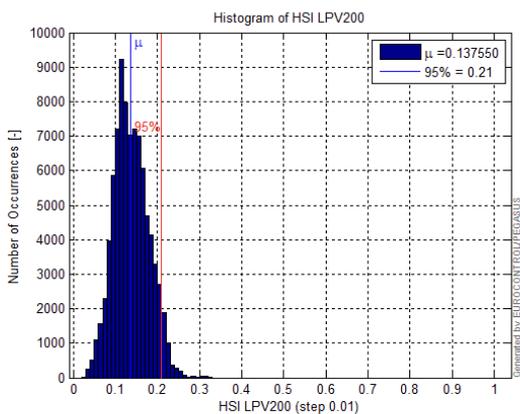


Figura 6.10: Índice de seguridad horizontal para el día 08/07/23.

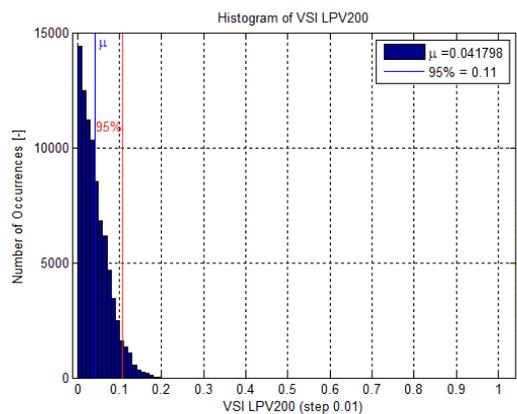


Figura 6.11: Índice de seguridad vertical para el día 08/07/23.

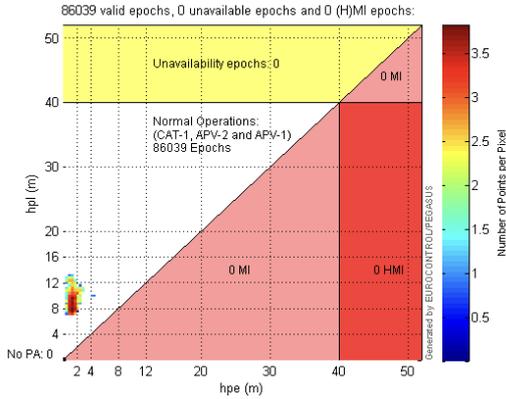


Figura 6.12: Diagrama de Stanford horizontal para el día 06/07/23.

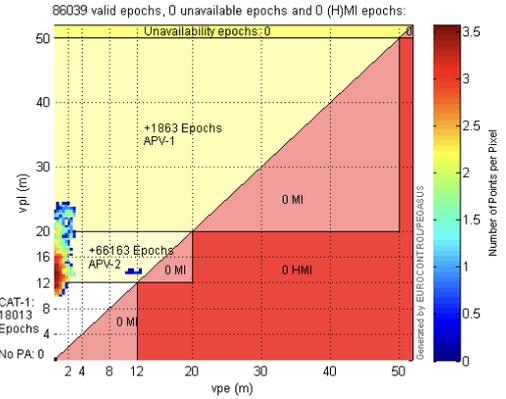


Figura 6.13: Diagrama de Stanford vertical para el día 06/07/23.

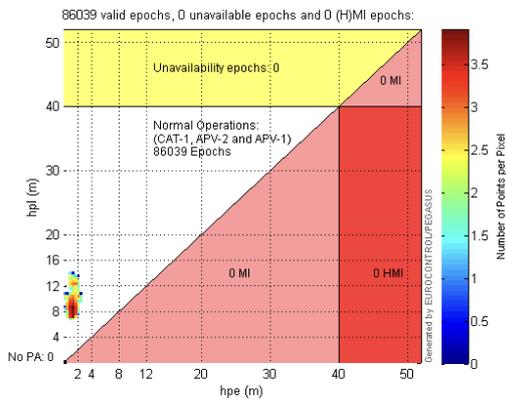


Figura 6.14: Diagrama de Stanford horizontal para el día 07/07/23.

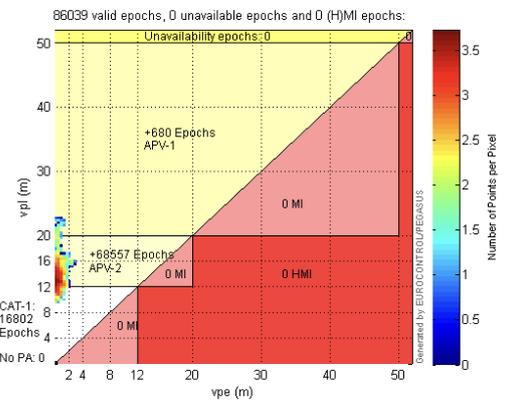


Figura 6.15: Diagrama de Stanford vertical para el día 07/07/23.

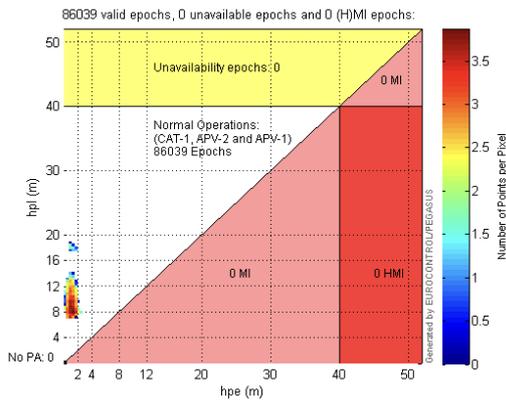


Figura 6.16: Diagrama de Stanford horizontal para el día 08/07/23.

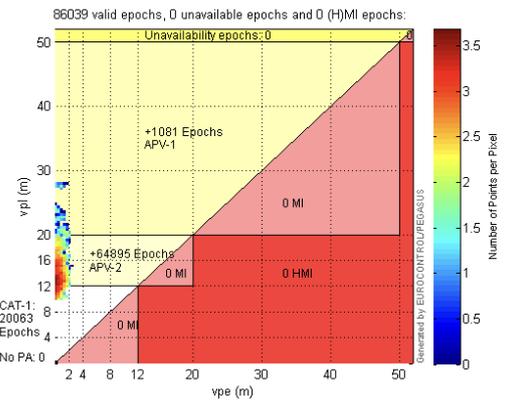


Figura 6.17: Diagrama de Stanford vertical para el día 08/07/23.

Para el caso de los Diagramas de Stanford verticales, se observa que el software ha establecido el límite de nivel de protección a 12 m. Hay que tener en cuenta que el nivel de protección debe ser menor al límite de alerta y que la OACI especifica en su Anexo 10 [42] que el límite de alerta vertical (VAL) para operaciones CAT I (LPV-200) es de 10 a 35 m. Por tanto, mediante un

análisis de seguridad, el nivel de protección límite podría elevarse hasta los 35 m, de forma que se cumplirían los requisitos de integridad en todos los casos.

6.3.3.3. Continuidad y Disponibilidad

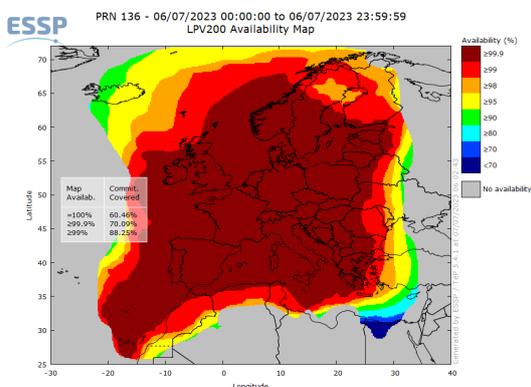


Figura 6.18: Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 06/07/23 [28].

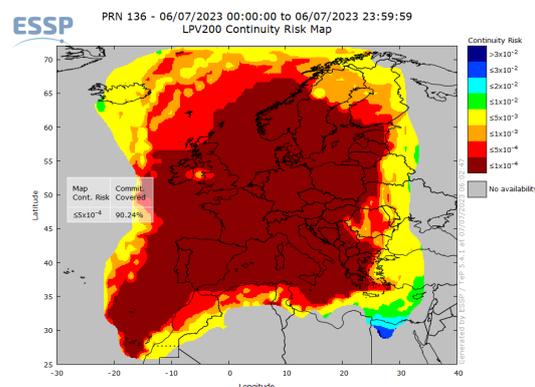


Figura 6.19: Continuidad del GEO PRN 136 el día 06/07/23 [29].

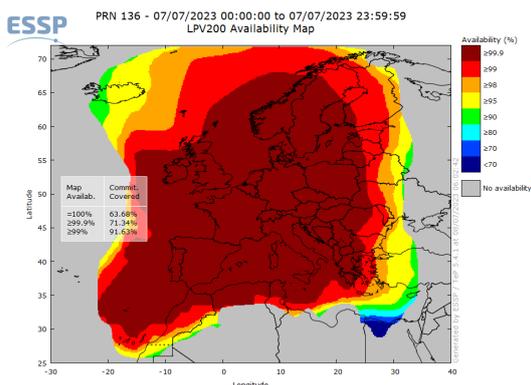


Figura 6.20: Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 07/07/23 [28].

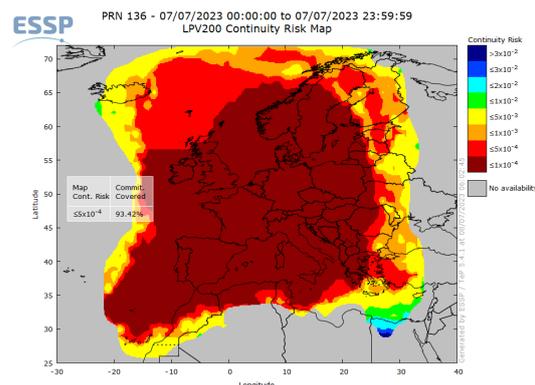


Figura 6.21: Continuidad del GEO PRN 136 día 07/07/23 [29].

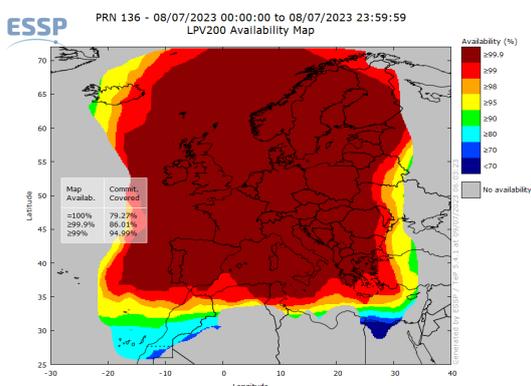


Figura 6.22: Disponibilidad del GEO PRN 136 el día 08/07/23 [28].

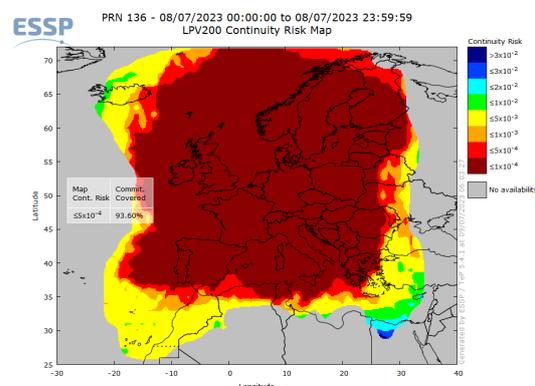


Figura 6.23: Continuidad del GEO PRN 136 el día 08/07/23 [29].

Se observa en las Figuras 6.18, 6.20 y 6.22 que la disponibilidad del servicio fue durante los tres días mayor al 99,9%, cumpliendo así con los objetivos de la OACI. Por su parte, la continuidad de los tres días (Figuras 6.19, 6.21 y 6.23) fue la mayor que el sistema ofrece, con un riesgo menor al $1 \cdot 10^{-4}$. Al igual que para el análisis a largo plazo, este valor no cumple con los requisitos, pero sí está dentro de los valores aceptables para empezar a usar el servicio. Por tanto, asumiendo el riesgo de continuidad, el sistema podrá ser utilizado.

6.3.4. Conclusiones corto plazo

Tras el análisis a corto plazo, se puede concluir que se cumplen con todos los requisitos de la OACI, haciéndose necesario un estudio de seguridad que permita elevar el nivel de protección vertical a los 35 m. Así mismo, también puede hacerse necesario la mitigación de los riesgos de continuidad. A pesar de ello, tras el análisis a largo y corto plazo, se podría concluir que se puede proseguir con el proceso (elaboración y valoración de cartas, ensayo en vuelo...) para la implementación de procedimientos LPV-200 en las pistas del aeropuerto de Ibiza.

Capítulo 7

Conclusión

El espacio aéreo está en pleno proceso de evolución hacia un espacio aéreo que de cabida a sus nuevos integrantes, los UAS. Esto implica la evolución de sus diferentes componentes, de los cuales el desarrollo del trabajo se ha centrado en la Navegación, para explicar la PBN.

La PBN se basa en parte en las ayudas a la navegación (NAVAIDs), de las que exige unos requisitos. A pesar de que se esté dando un giro hacia la navegación satelital, se ha visto que las diferentes constelaciones GNSS no pueden cumplir con dichos requisitos. Surgen los sistemas de aumentación satelital SBAS, de los que se ha realizado un análisis exhaustivo, mostrando las diferencias y detallando el nivel de integración de los sistemas EGNOS y WAAS, que son los más relevantes.

Para los sistemas SBAS de Europa y de Estados Unidos, se ha llevado a cabo un estudio de la integración, a través del análisis del nivel de implementación de las operaciones LPV, pues estos sistemas son los que permiten estas operaciones.

Se llega a la conclusión de que Estados Unidos tiene un nivel de integración de WAAS mayor al que Europa tiene de EGNOS. No obstante, para el caso de Europa, se conocen los planes de implementación de aproximaciones LPV en más aeropuertos. Se procede, pues, a demostrar cómo es parte del proceso de validación de un procedimiento LPV-200 para el aeropuerto de Ibiza (LEIB).

Tras el análisis en tierra a largo y corto plazo, y teniendo en cuenta que se trata de una aproximación, pues no se despliegan receptores GNSS en el aeropuerto, se concluye que se podría proseguir con la creación de cartas y otros siguientes pasos, previa validación en vuelo del procedimiento.

7.1. Trabajos futuros

Queda por revisar periódicamente los niveles de integración de ambos sistemas SBAS, pues es solo cuestión de tiempo que la integración en Europa llegue a los niveles de la de Estados Unidos. Los planes para 410 nuevos procedimientos en Europa (ver Figura 5.36) hacen suponer que el porcentaje de aeropuertos equipados irá convergiendo a un valor similar para las dos potencias económicas.

Así mismo, se ha visto en el análisis a largo plazo de la validación cómo el ciclo solar afecta a la ionosfera y redundando en un peor rendimiento de EGNOS. Queda por verificar qué mejora supondrá la actualización del sistema que promete eliminar el efecto ionosférico usando la doble frecuencia.

Parte II

Pliego de condiciones

Capítulo 1

Condiciones generales

1.1. General

Los trabajos en los que se emplea una pantalla de visualización de datos (PVD) están sujetos a una serie de riesgos. Los principales son:

- Trastornos músculo-esqueléticos: causados por mantener una postura corporal estática durante un periodo prolongado de tiempo.
- Problemas visuales: causados por forzar a los ojos al enfoque continuo a cortas distancias y por la luz azul emitida por las pantallas.
- Fatiga mental.

La probabilidad de sufrir cualquiera de los anteriores trastornos está relacionada con los periodos de descanso y de trabajo ante la pantalla, la capacidad del trabajador para llevar su propio ritmo de trabajo o no y la dificultad de la tarea, que requerirá más o menos atención.

Para la prevención de riesgos laborales, se elabora una normativa sobre las PVD, que está recogida en el 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 [110].

Dicha normativa para la prevención de riesgos laborales tiene en cuenta ciertos factores generales, como son la seguridad, la higiene y la ergonomía en el trabajo.

1.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril

Artículo 1. Objeto.

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.
2. Las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - a) Los puestos de conducción de vehículos o máquinas.
 - b) Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte.
 - c) Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - d) Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - e) Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - f) Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

- a) Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
- b) Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
- c) Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo.

En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo.

2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre estas, especialmente, las siguientes:

- 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.
3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.
 4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:
 - a) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
 - b) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
 - c) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.
2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.
3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación.

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto.
2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto.
3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado 2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Disposición transitoria única. Plazo de adaptación de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

Los equipos que incluyan pantallas de visualización puestas a disposición de los trabajadores en la empresa o centro de trabajo con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Real Decreto deberán ajustarse a los requisitos establecidos en el anexo en un plazo de doce meses desde la citada entrada en vigor.

Disposición final primera. Elaboración de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de riesgos.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, elaborará y mantendrá actualizada una Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización.

Disposición final segunda. Habilitación normativa.

Se autoriza al Ministro de Trabajo y Asuntos Sociales para dictar, previo informe de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, las disposiciones necesarias en desarrollo de este Real Decreto y, específicamente, para proceder a la modificación del anexo del mismo para aquellas adaptaciones de carácter estrictamente técnico en función del progreso técnico, de la evolución de las normativas o especificaciones internacionales o de los conocimientos en el área de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

Dado en Madrid a 14 de abril de 1997.

JUAN CARLOS R.

El Ministro de Trabajo y Asuntos Sociales,
JAVIER ARENAS BOCANEGRA

ANEXO

Disposiciones mínimas

Observación preliminar: las obligaciones que se establecen en el presente anexo se aplicarán para alcanzar los objetivos del presente Real Decreto en la medida en que, por una parte, los elementos considerados existan en el puesto de trabajo y, por otra, las exigencias o características intrínsecas de la tarea no se opongan a ello.

En la aplicación de lo dispuesto en el presente anexo se tendrán en cuenta, en su caso, los métodos o criterios a que se refiere el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto de los Servicios de Prevención.

1. Equipo

a) Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.

La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.

El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.

La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c) Teclado.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos.

Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.

La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.

La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.

Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.

El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.

El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable. La altura del mismo deberá ser regulable.

El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.

Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno

a) Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b) Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado.

El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla.

Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f) Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. Interconexión ordenador/persona

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

a) El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.

b) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.

c) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.

d) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.

e) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

Capítulo 2

Especificaciones técnicas

A pesar de la naturaleza de este trabajo, que incluye una parte puramente teórica, que se basa en la búsqueda y recopilación de información, y otra práctica, en la que se valida un procedimiento, no se requiere más que equipos informáticos con los requisitos de procesamiento adecuados. A continuación se especifican los detalles.

2.1. Especificaciones de materiales y equipos

2.1.1. Hardware

Para la redacción del proyecto se ha requerido el empleo de un equipo informático con el que se pudiese acceder a Internet y a la plataforma online de redacción en L^AT_EX, Overleaf. El equipo empleado ha sido un ordenador portátil *MacBook Pro de 14"*. También durante la redacción del proyecto, ha sido muy conveniente el uso de una pantalla secundaria con la que poder buscar información, mientras se redactaba en la principal.

2.1.2. Software

El software que se ha utilizado ha sido:

- Redacción: L^AT_EX, usando la plataforma Overleaf.
- Búsqueda de información: Safari.
- Procesado de imágenes: Adobe Photoshop CC.

- Visualización de documentos: Vista Previa.
- Validación de procedimiento: Parallels Desktop, Consola de Windows, the Unarchiver, FileZilla, Hatanaka, Matlab R2022b, PEGASUS 19.07.03 (Convertor, GNSS Solution y M-File Runner).
- Paquete Microsoft Office 365 para visualización de ciertos datos, procesado de bases de datos con Excel y preparación de la presentación.

2.1.3. Conexión a Internet

La conexión a Internet ha sido requerida en todas las fases del proyecto, tanto en la de búsqueda y recopilación de información, como en la de validación y la de redacción, pues la plataforma Overleaf es una plataforma online. Esta conexión ha sido proporcionada por un proveedor de telefonía móvil privado.

2.1.4. Conocimientos previos

Para la parte del proyecto de búsqueda y recopilación de información, se requieren unos conocimientos previos relacionados con el espacio aéreo, la PBN, los sistemas GNSS y las aumentaciones. Para la parte de la validación, también han sido requeridos los conocimientos teóricos, pero además, cierto conocimiento de programación en *Matlab* y de manejo de software, como es *PEGASUS*.

La realización del trabajo ha redundado en un gran aprendizaje y asentamiento de conocimientos. Además, ha supuesto el conocimiento de los planes de futuro del espacio aéreo y de cómo se pretende mejorar este a través de los nuevos NAVAIDs: los sistemas GNSS.

2.1.5. Conocimientos informáticos

Los conocimientos informáticos requeridos para la realización de este trabajo no son muy exigentes. Sí se requerían conocimientos sobre el procesado y creación de imágenes/figuras, así como también era requisito el tener una base sólida del editor de textos en \LaTeX . Además, se requería un mínimo conocimiento del uso de herramientas ofimáticas y de programación en *Matlab*.

2.1.6. Supervisión

El tutor del proyecto ha sido el encargado de la supervisión de este, pues tiene amplia experiencia en el campo de la navegación aérea y todo lo relacionado con los sistemas de navegación, tanto terrestres, como especialmente, los satelitales. Así mismo, también es conocedor de las distintas especificaciones y procedimientos tratados a lo largo del trabajo.

2.2. Condiciones de calidad

En un proyecto de la naturaleza de este, la calidad hace referencia a que la información debe ser precisa y fiable. Por ello, los documentos e información empleados para la redacción del proyecto (ver Bibliografía) son eminentemente procedentes de fuentes fidedignas, como son organismos internacionales (e.g. OACI, EUROCONTROL, IATA), autoridades estatales (e.g. AESA, FAA) o portales aeronáuticos fiables (e.g. Navipedia, SKYbrary). Además, los datos usados para la validación proceden de autoridades como son el IGN y la Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial.

Parte III

Presupuesto

Capítulo 1

Presupuesto

1.1. Introducción

A continuación se va a realizar un estudio del coste aproximado de este trabajo, teniendo en cuenta todos los gastos asociados, que, como se ve en la Sección 1.2, se desglosan en costes de hardware, software y personal.

1.2. Desglose de los costes unitarios

Hardware

Se ha empleado, como se comentaba anteriormente, un portátil *MacBook Pro de 14"*, así como un *iPad Air 4* a modo de pantalla secundaria. Para estos elementos, se va a tener en cuenta la amortización respectiva, tal y como se muestra en la Tabla 1.1.

Dispositivo	Coste total (€)	Periodo de amortización (meses)	Periodo amortizado (meses)	Importe bruto (€)	IVA (21 %)	Total (€)
MacBook Pro de 14"	1650,00	72	4	91,67	19,25	110,92
iPad Air 4	495,00	60	4	33,00	6,93	39,93
Subtotal HW	-	-	-	124,67	26,18	150,85

Tabla 1.1: Costes de hardware.

Software

El único software que se ha utilizado con licencia es el que aparece en la Tabla 1.2

Programa	Coste mensual (€)	Periodo de uso(meses)	Importe bruto (€)	IVA (21 %)	Total (€)
Paquete Microsoft Office 365	5,79	4	23,16	4,86	28,02
Adobe Photoshop CC	16,25	4	65,00	13,65	78,65
Matlab	4,75	1	4,75	1,00	5,75
Parallels Desktop	3,45	1	3,45	0,72	4,17
PEGASUS 19.07.03	0,00	1	0,00	0,00	0,00
Subtotal SW	-	-	96,36	20,23	116,59

Tabla 1.2: Costes de software.

Personal

El personal que se ha involucrado en la realización de este proyecto es:

- Estudiante universitario: ha realizado la redacción al completo de este documento, con un total aproximado de 425 horas contabilizadas. Dado que el estudiante realiza el proyecto sin ningún tipo de contrato o beca, se considera que el coste horario es 0.
- Profesor, ingeniero superior: se ha encargado de la supervisión. Se contabiliza un coste horario aproximado de 25€/hora.

Con todo ello, se obtiene el coste que se detalla en la Tabla 1.3.

Personal	Coste horario (€/hora)	Horas (h)	Importe bruto (€)	IVA (21 %)	Total (€)
Estudiante universitario	0	425	0,00	0,00	0,00
Profesor	25	10	250,00	52,50	302,50
Subtotal personal			250,00	52,50	302,50

Tabla 1.3: Costes de personal.

1.3. Presupuesto total

El presupuesto total consistirá en la suma aritmética de los diferentes subtotales, tal y como se realiza en la Tabla 1.4.

Concepto	Importe (€)
Subtotal HW	150,85
Subtotal SW	116,59
Subtotal personal	302,50
Total	569,94

Tabla 1.4: Presupuesto total.

El presupuesto total de la realización del proyecto asciende a QUINIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

Anexo I
Relación del trabajo con los
objetivos de desarrollo sostenible de
la Agenda 2030

A continuación, en la Tabla 1.1 se muestran los 17 diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Se marca con “X” el nivel de relación del proyecto con cada uno de ellos.

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			X	
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 1.1: Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030

De todos los ODS, destacan especialmente el 8 y 9, pues están relacionados con el crecimiento económico y la innovación e infraestructuras. A lo largo del proyecto se habla de los planes de la UE y EEUU para el desarrollo de nuevos sistemas que permitan la mejora del espacio aéreo: proyectos SESAR y NextGen. También la PBN requiere innovación e infraestructuras. Además, los sistemas GNSS y SBAS de los que se habla, están a la vanguardia tecnológica y son los que van a permitir mejorar el espacio aéreo. Esto llevará consigo un crecimiento económico, pues permitirá más y mejores operaciones aéreas.

La integración de las aproximaciones LPV y LPV-200 en diferentes aeropuertos, aparte de suponer un despliegue de innovación, también supone una mejora del tráfico aéreo, en tanto en cuanto permite operaciones más eficientes, reduciendo el consumo de combustible de las aeronaves (y la emisión de CO₂ y permitiendo una mayor sostenibilidad (ODS 11 y 13).

Bibliografía

- [1] EUROCONTROL. *Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP)*, 2013.
- [2] EUROCONTROL. *EUROPEAN AVIATION IN 2040. Challenges of Growth. Annex 1 - Flight Forecast to 2040*, 2018.
- [3] Asociación internacional del Transporte Aéreo. *Global Outlook for Air Transport*, Diciembre 2022.
- [4] EUROCONTROL. *Aviation Outlook 2050: air traffic forecast shows aviation pathway to net zero CO₂ emissions*, Junio 2022.
- [5] SESAR. *Plan Maestro de la Gestión del Tráfico Aéreo Europeo - Resumen ejecutivo*, 2020.
- [6] U.S. Department of Transportation – Federal Aviation Administration. *NextGen Annual Report*, 2020.
- [7] EUROCONTROL. *What is Area Navigation?*, 2013.
- [8] Navipedia. *Integrity*, Julio 2018.
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>.
- [9] I. Quintanilla. *Funcionamiento de EGNOS. Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía*. Universitat Politècnica de Valencia, 2022.
- [10] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Doc 9613 AN/937 – Performance-based Navigation (PBN) Manual*. Fourth Edition, 2013.
- [11] EUROCONTROL – PBN Portal. *Oceanic/Remote Continental Operations*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Applications/Oceanic-Remote-Operations.html>.
- [12] EUROCONTROL – PBN Portal. *Approach Operations - Overview*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Using-PBN/PBN-on-the-Flight-Deck/Approach-Operations---Overview.html>.

- [13] EUROCONTROL – PBN Portal. *Approach Operations*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Applications/Approach-Operations.html>.
- [14] Navipedia. *GNSS Basic Observables*, 2020.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables.
- [15] Navipedia. *GNSS Measurements Modelling*, 2013.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Measurements_Modelling.
- [16] Navipedia. *GNSS Signal*, 2014.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal.
- [17] Unión Europea. *Galileo Signal-In-Space Interface Control Document*, Diciembre 2016.
- [18] European Union Agency for the Space Program. *Galileo is the European global satellite-based navigation system*, Junio 2023.
<https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/What-Galileo>.
- [19] Navigation National Coordination Office for Space-Based Positioning and Timing. *Control Segment*, Agosto 2021.
<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>.
- [20] Navigation National Coordination Office for Space-Based Positioning and Timing. *Data From the First Week Without Selective Availability*, Octubre 2018.
<https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/>.
- [21] European Union Agency for the Space Program. *What is SBAS?*, Noviembre 2022.
<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>.
- [22] European Union Agency for the Space Program. *EGNOS Service Note 026*, Julio 2023.
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/sites/default/files/documents/service_notice-26.pdf.
- [23] European GNSS Agency. *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document Issue 3.4 (In Force)*, Mayo 2021.
- [24] European Union Agency for the Space Program. *LPV Procedures Map*, Julio 2023.
<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/resources-tools/lpv-procedures-map>.
- [25] Federal Aviation Administration. *Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard*, Octubre 2008.
- [26] Federal Aviation Administration. *WAAS GEO Footprint*, Junio 2021.
<https://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayGEOStatus.htm>.
- [27] Federal Aviation Administration. *24-Hour WAAS and GPS Performance*, Julio 2023.
<https://www.nstb.tc.faa.gov/24hour-plots.html>.
- [28] European Union Agency for the Space Program. *LPV200 AVAILABILITY*, Agosto 2023.
<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/lpv200-availability>.

-
- [29] European Union Agency for the Space Program. *LPV200 CONTINUITY*, Agosto 2023. https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/safety-of-life-service/historical-performance/lpv200-continuity?check_logged_in=1.
- [30] Unión Europea. Open service service definition document, Noviembre 2021.
- [31] European Global Navigation Satellite Systems Agency. Galileo high accuracy service (has), 2020.
- [32] Navipedia. *Galileo Performances*, Mayo 2021. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Performances#cite_note-GALHLD-2.
- [33] Navipedia. *GPS Signal Plan*, Enero 2021. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan.
- [34] Navigation National Coordination Office for Space-Based Positioning and Timing. *Space Segment*, Junio 2022. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
- [35] Navipedia. *GPS Performances*, Diciembre 2020. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Performances.
- [36] European Union Agency for the Space Program. *Programme*, Octubre 2022. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/programme>.
- [37] GLONASS IAC. *Sobre el sistema GLONASS*, s.f. https://glonass-iac.ru/spa/about_glonass/.
- [38] Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office. *Constellation Status*, Julio 2023. <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>.
- [39] China Satellite Navigation Office. *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 2.0)*, December 2018.
- [40] Navipedia. *GLONASS Services*, Septiembre 2014. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Services.
- [41] China Satellite Navigation Office. *BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0)*, Mayo 2021.
- [42] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Annex 10 - Aeronautical Telecommunications. Volume I - Radio Navigation Aids*. Sixth Edition, Junio 2006.
- [43] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - May 2023*, Mayo 2022.
- [44] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - July 2023*, Julio 2022.
- [45] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - February 2023*, Febrero 2022.
-

- [46] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - March 2023*, Marzo 2022.
- [47] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - April 2023*, Abril 2022.
- [48] European Union Agency for the Space Program. *Monthly Performance Report - June 2023*, Junio 2022.
- [49] AESA. *Espacio aéreo*, s.f.
<https://www.seguridadaaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/espacio-aereo/descripcion>.
- [50] SKYbrary. *4D Trajectory Concept*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/4d-trajectory-concept>.
- [51] EUROCONTROL. *Communications, navigation and surveillance*, s.f.
<https://www.EUROCONTROL.int/communications-navigation-and-surveillance>.
- [52] EUROCONTROL. *Future communications infrastructure and multilink for the long term*, s.f.
<https://www.EUROCONTROL.int/function/future-communications-infrastructure-and-multilink-long-term>.
- [53] SKYbrary. *SATCOM*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/satcom>.
- [54] EUROCONTROL. *L-band digital aeronautical communication system*, s.f.
<https://www.EUROCONTROL.int/system/l-band-digital-aeronautical-communication-system>.
- [55] EUROCONTROL. *Aeronautical mobile airport communications system datalink*, s.f.
<https://www.EUROCONTROL.int/system/aeronautical-mobile-airport-communications-system-datalink>.
- [56] EUROCONTROL. *New pan-European Network Service*, s.f.
<https://www.EUROCONTROL.int/service/new-pan-european-network-service>.
- [57] SKYbrary. *Surveillance*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/surveillance>.
- [58] SKYbrary. *Primary Surveillance Radar (PSR)*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/primary-surveillance-radar-psr>.
- [59] SKYbrary. *Secondary Surveillance Radar (SSR)*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/secondary-surveillance-radar-ssr>.
- [60] SKYbrary. *Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B)*, s.f.
<https://www.skybrary.aero/articles/automatic-dependent-surveillance-broadcast-ads-b>.
- [61] SKYbrary. *Air Traffic Management (ATM)*, s.f.
<https://skybrary.aero/articles/air-traffic-management-atm>.

-
- [62] SKYbrary. *Air Traffic Service (ATS)*, s.f.
<https://skybrary.aero/articles/air-traffic-service-ats>.
- [63] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Doc 9854 – Global Air Traffic Management Operational Concept*. First Edition, 2005.
- [64] Asociación internacional del Transporte Aéreo. *Comunicado Nº 55 - Estadísticas confirman 2020 como el peor año de la historia de la aviación*, Agosto 2021.
- [65] Asociación internacional del Transporte Aéreo. *Comunicado Nº 02 - El tráfico aéreo de pasajeros continuó recuperándose en noviembre*, Enero 2023.
- [66] SESAR. *SESAR has three phases*, 2020.
- [67] Coordination Committee & Deployment Coordination Committee. *NextGen SESAR - State of Harmonisation*, Septiembre 2020.
- [68] Navipedia. *Accuracy*, Julio 2018.
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Accuracy>.
- [69] Navipedia. *Continuity*, Septiembre 2014.
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Continuity>.
- [70] Navipedia. *Availability*, Septiembre 2014.
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Availability>.
- [71] SKYbrary. *Minimum Navigation Performance Specifications (MNPS)*, s.f.
- [72] EUROCONTROL – PBN Portal. *En-route Operations*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Applications/En-route-Operations.html>.
- [73] EUROCONTROL – PBN Portal. *Terminal Operations*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Applications/Terminal-Operations.html>.
- [74] Federal Aviation Administration. *Required Navigation Performance (RNP) Approaches (APCH)*, 2023.
- [75] EUROCONTROL. *RNP Approaches*, Noviembre 2019.
- [76] EUROCONTROL – PBN Portal. *RNP Approaches*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Applications/Approach-Operations/RNP-Approaches.html>.
- [77] EUROCONTROL – PBN Portal. *Navigation Infrastructure*, 2019.
<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Infrastructure/Ground-based-NAVAIDs.html>.
- [78] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems*. Second Edition, 2002.
- [79] Navipedia. *Coordinates Computation from Almanac Data*, 2022.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Coordinates_Computation_from_Almanac_Data.
-

- [80] James Collins; Bernhard Hofmann-Wellenhof; Herbert Lichtenegger. *Global Positioning System - Theory and Practice*, Enero 2001.
- [81] Antonio Martellucci; Roberto Prieto. *3rd European Conference on Antennas and Propagation - Review of tropospheric, ionospheric and multipath data and models for global navigation satellite systems*, 2009.
- [82] Navipedia. *Galileo General Introduction*, Enero 2021.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction#cite_note-EC_GAL_web-5.
- [83] European Union Agency for the Space Program. *Constellation Information*, Julio 2023.
<https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>.
- [84] Navipedia. *Galileo Navigation Message*, Junio 2021.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message.
- [85] European Union Agency for the Space Program. *System*, s.f.
<https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>.
- [86] Navipedia. *GPS Navigation Message*, Enero 2021.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message.
- [87] Navigation National Coordination Office for Space-Based Positioning and Timing. *GPS Applications*, Noviembre 2014.
<https://www.gps.gov/applications/>.
- [88] Navipedia. *GLONASS Future and Evolutions*, Mayo 2021.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions.
- [89] Navipedia. *BeiDou Signal Plan*, Enero 2020.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Signal_Plan.
- [90] China Satellite Navigation Office. *Development of the BeiDou Navigation Satellite System (Version 4.0)*, Diciembre 2019.
- [91] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Doc 9849 AN/457 – Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual*. First Edition, 2005.
- [92] SRVSOP. *Circular de asesoramiento 91-011*, Mayo 2012.
- [93] Navipedia. *SBAS Fundamentals*, Julio 2018.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=SBAS_Fundamentals.
- [94] I. Quintanilla. *GPS: Modelos matemáticos. Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía.*, 2022.
- [95] Navipedia. *SBAS Space Segment*, Marzo 2020.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=EGNOS_Space_Segment.
- [96] European Union Agency for the Space Program. *About EGNOS*, s.f.
<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/egnos-system/about-egnos>.
- [97] Aviation Codes Central. *Airline Designator / Code Database Search*, Julio 2023.
<https://www.avcodes.co.uk/airlcodesearch.asp>.

-
- [98] Our Airports. *Airport Codes*, Julio 2023.
<https://datahub.io/core/airport-codes#data>.
- [99] Federal Aviation Administration. *MasterRNAVs - 06/15/2023 (GPS/WAAS Approaches)*, Julio 2023.
<https://www.faa.gov/about/officeorg/headquartersoffices/ato/navigation-programs/masterrnavs-06152023-gpswaas-approaches>.
- [100] Organización de la Aviación Civil Internacional. *Doc 8168 – Procedures for Air Navigation Services. Aircraft Operations. Volume II - Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. Fifth Edition, 2006.
- [101] aena. *Estadísticas del tráfico aéreo*, 2022.
<https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>.
- [102] European Union Agency for the Space Program. *Open Service Realtime performance*, [Julio 2023].
<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/services/open-service/open-service-realtime-performance>.
- [103] Instituto Geográfico Nacional. *Visualizador Geodesia*, [Agosto 2023].
https://visualizadores.ign.es/redes_geodesicas/.
- [104] ENAIRE AIP ESPAÑA. *AD 2 LEIB - Datos del aeródromo*, Septiembre 2022.
https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEIB/LE_AD_2_LEIB_en.pdf.
- [105] European Union Agency for the Space Program. *Documents*, Agosto 2023.
<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/documents>.
- [106] European Union Agency for the Space Program. *EGNOS SERVICE NOTICE #25*, Mayo 2023.
- [107] Instituto Geográfico Nacional. *Descarga de ficheros RINEX*, Agosto 2023.
<https://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-datos-rinex>.
- [108] EUROCONTROL. *PEGASUS Software Manual*, Enero 2004.
- [109] Instituto Geográfico Nacional. *Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS)*, Agosto 2023.
<https://www.ign.es/web/gds-gnss-estaciones-permanentes>.
- [110] BOE. *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.*, Abril 1997.
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-8671>.