

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EGNOS EN AERONAVES NO TRIPULADAS PARA APLICACIONES DE VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS SBAS

Autor: D. Alejandro Sánchez Durán

Tutor: Dr. D. Israel Quintanilla García

Cotutor: Dr. D. Pedro Yuste Pérez

Titulación: Grado en Ingeniería Aeroespacial

Julio, 2018



Agradecimientos

La realización del presente Trabajo Fin de Grado ha conllevado gran cantidad de esfuerzo, tiempo y dedicación. Y no hubiera sido posible sin la ayuda de instituciones, instalaciones y, en definitiva, personas que han creído en este proyecto y lo han hecho posible.

En primer lugar, debo dar las gracias a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y a la Universitat Politècnica de València por haberme formado en muchos aspectos, no solo académicos. La UPV puede sentirse orgullosa de preparar a sus alumnos de cara a la vida laboral y al futuro, y parte de nuestro éxito será debido a estas instituciones.

Gracias a aquellos profesores que, sin dudar ni un momento, han apoyado el proyecto y han volcado toda su ayuda para sacarlo adelante: a mi tutor, Israel Quintanilla, y a mi cotutor, Pedro Yuste, por sus consejos, así como a Rafael Masot y Miguel Alcañiz, por su interés sincero y su incalculable ayuda.

Mi más sinceras gracias a Antonio Martín, de la compañía Septentrio, por su desinteresada ayuda y su apoyo a la hora de configurar el equipo receptor. Muchísimas gracias al equipo de EtecDrones por prestarnos una aeronave con la mayor celeridad posible, y dejarnos sus instalaciones para trabajar y preparar el equipo. Y, en particular, gracias a Jorge Esteve por su excelente trabajo, su simpatía, su buen hacer y su valía. Buena parte del proyecto es posible gracias a él, y tanto él como EtecDrones merecen un reconocimiento especial.

A mi madre, a mi padre y a mi hermana. Son mi familia, mi apoyo constante y mi brújula. Soy lo que soy hoy en día gracias a ellos, a sus sabios consejos y

a su amor incondicional. Ellos siempre me han recomendado que me rodee de las mejores personas, sin saber que ellos son esas personas. Os quiero.

Siguiendo el consejo previo, resta citar a aquellos, más que compañeros, amigos, que han penado junto a mí estos años, ya sea en clase o a dos avenidas de distancia. A mis cuatro dragones, Marcos, Álvaro, Andrea y Joan, por ser mi referente y mi equipo, además de unos compañeros excepcionales, gente perspicaz que llegará a conseguir todo lo que se proponga. A Daniel y Lucía, por su corazón de oro, su sabiduría, y porque los quiero a rabiar. Y a Eva, Rosa, Antonio, Cecilia y el resto de mis compañeros de clase, especialmente de la rama de Aeronavegación, por ser un grupo increíble formado por personas asombrosas con las que espero volver a cruzarme en algún momento de mi vida.

A todos vosotros, gracias.

Resumen

El avance actual de la tecnología resulta imparable. Muestra de ello es el mercado actual de aeronaves no tripuladas, cuya demanda y utilización ha aumentado exponencialmente en los últimos años. Cada vez son más las aplicaciones en las que los drones cobran protagonismo, y la navegación aérea debe tomar partido. El presente Trabajo Fin de Grado, con título *Análisis para la implementación del sistema EGNOS en aeronaves no tripuladas para aplicaciones de validación de procedimientos SBAS*, tratará el proceso seguido para realizar y validar un procedimiento SBAS de navegación aérea empleando una aeronave no tripulada o RPAS (del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*); específicamente, se tratará de validar una aproximación LPV-200, basada en el sistema de aumentación europeo EGNOS.

El trabajo empleará los datos obtenidos de ensayos a largo y corto plazo para determinar la viabilidad del proceso y proceder con su certificación mediante la realización de un ensayo de vuelo. En primer lugar, se realizará una introducción teórica a los conceptos básicos de este entorno, a fin de poder comprender la base sobre la que se sustenta este trabajo: los sistemas GNSS, los sistemas de aumentación y la navegación basada en prestaciones (PBN) serán descritos a fondo; resultará conveniente leer el *Glosario* adjunto al documento para poder navegar entre la multitud de abreviaturas que aparecerán a lo largo del trabajo. Seguidamente, se entrará en materia, explicando el proceso de validación a seguir, el proceso de montaje e instalación del sistema receptor de señal GPS, el ensayo de vuelo y el correspondiente post-proceso de los datos obtenidos. Finalmente, se extraerán las conclusiones pertinentes con las que determinar el resultado del proceso de certificación.

Abstract

Current evolution of technology seems unstoppable. Prove of that can be seen in the actual unmanned aircraft market, whose demand and utilization has increased exponentially in the last years. Every time, more and more applications involving drones appear, being air navigation part of these recent changes. The present Final Project, named *Analysis for the implementation of EGNOS system in unmanned aircraft aimed to develop validation applications for SBAS procedures*, will treat the process that has been followed to validate a SBAS air navigation procedure employing a RPAS; namely, the main objective will be to validate a LPV-200 approach, based on the European augmentation system EGNOS.

As it will be explained later, data obtained from long and short term analysis will be used to assess the viability of the process and proceed with its certification by means of a flight procedure. First, a theoretical introduction will be performed about basic concepts: GNSS systems, augmentation systems and performance based navigation (PBN) will be introduced; it is recommendable to read the Glossary of terms, due to the amount of acronyms that will appear along the pages. After this, the validation process, receiver equipment process, flight procedure and post-processing tasks will be explained. Finally, the conclusions will be extracted, and therefore the result of the certification process will be obtained.

Índice general

Resumen	I
Índice general	VII
1 Introducción	1
1.1 Preámbulo histórico	1
1.2 Motivación	3
1.3 Objetivos	6
2 GNSS	7
2.1 GPS	9
2.1.1 Proceso de desarrollo	9
2.1.2 Segmentos del sistema	11
2.1.3 Funcionamiento del sistema	12
2.2 GLONASS	13
2.3 Galileo	14
2.4 BeiDou.	17

2.5	Sistemas regionales	18
2.5.1	NAVIC o IRNSS	18
2.5.2	QZSS	19
3	Sistemas de aumentación	21
3.1	<i>Performance GNSS</i>	22
3.1.1	Precisión	22
3.1.2	Integridad	23
3.1.3	Disponibilidad	27
3.1.4	Continuidad	28
3.2	<i>Aircraft-Based Augmentation Systems</i> (ABAS)	30
3.3	<i>Ground-Based Augmentation Systems</i> (GBAS)	30
3.4	<i>Satellite-Based Augmentation Systems</i> (SBAS)	31
4	<i>Satellite-Based Augmentation Systems</i> (SBAS)	33
4.1	Fundamento matemático	36
4.2	EGNOS	38
4.2.1	Arquitectura del sistema	39
4.2.2	Correcciones generadas	40
4.2.3	Estructura del mensaje	41
4.2.4	Servicios	43
4.2.5	Interoperabilidad y evolución futura	45
4.3	Otros sistemas SBAS	46
4.3.1	WAAS	46
4.3.2	MSAS	47
4.3.3	GAGAN	47
5	<i>Performance Based Navigation</i> (PBN)	49
5.1	Problemática de la navegación convencional	50
5.2	Concepto PBN	51
5.3	Especificaciones PBN	53
5.4	Especificaciones en aproximaciones (RNP APCH)	55
5.4.1	LPV-200	57

5.5 SESAR.	60
6 Validación de procedimientos PBN	63
6.1 Especificaciones de navegación	64
6.1.1 Requisitos de la aeronave	64
6.1.2 Procedimientos de operación	65
6.1.3 Programa de formación.	66
6.2 Requerimientos de señal en aproximaciones LPV-200	66
6.3 Proceso de validación	70
6.3.1 Evaluación a largo plazo	70
6.3.2 Evaluación a corto plazo	70
6.3.3 Ensayo de vuelo	71
7 Normativa y seguridad operacional aplicada al sector de los drones	73
7.1 Terminología	75
7.2 Normativa española sobre aeronaves no tripuladas.	76
7.3 Metodología SORA	78
8 Software empleado en el tratamiento de datos	81
8.1 RxTools	82
8.2 PEGASUS	83
9 Ejecución del proceso de validación	85
9.1 Análisis de la misión.	86
9.2 Equipo receptor	89
9.3 Pesos equivalentes	92
9.4 Configuración del módulo de recepción	92
9.5 Montaje del equipo receptor en la aeronave	95
9.6 Pruebas de interferencia y apantallamiento.	96
9.7 Ensayo de vuelo.	97
9.8 Post-procesado	98

10 Resultados	103
10.1 Aproximación realizada	104
10.2 Precisión	105
10.3 Integridad	107
10.4 Continuidad	109
10.5 Disponibilidad	111
11 Conclusiones	113
Bibliografía	115

Índice de figuras

1.1. Implementación de operaciones LPV-200 a nivel europeo [4] . . .	5
3.1. Diagrama de Stanford [16]	25
5.1. Componentes básicos de la navegación PBN [32]	52
5.2. Especificaciones de navegación [32]	54
5.3. Aproximaciones según el tipo de guiado vertical [31]	56
5.4. Aproximaciones LPV en España [4]	59
6.1. Requerimientos de señal en el servicio <i>Safety of Life</i> [29]	67
6.2. Disponibilidad de las operaciones LPV-200 en Europa [29]	68
6.3. Continuidad de las operaciones LPV-200 en Europa [29]	69
6.4. Precisión de las operaciones LPV-200 en Europa [29]	69
7.1. Metodología SORA [46]	79
9.1. Aproximación al aeroclub de Chiva	87

9.2. Especificaciones del modelo Wind-8	88
9.3. Dimensiones del receptor AsteRx2e HDC [51]	90
9.4. Dimensiones de la antena PolaNt [52]	91
9.5. Interfaz GUI de RxControl	93
9.6. Índice K_p [53]	97
9.7. RPAS en pista, listo para despegar	98
9.8. Interfaz del módulo <i>Convertor</i>	99
9.9. Interfaz del módulo GNSS <i>Solution</i>	100
9.10. Interfaz del módulo GNSS <i>Solution</i>	101
10.1. Comparación entre la ruta planificada y la ruta volada	104
10.2. Comparación entre la ruta planificada y la última aproximación	104
10.3. Histograma del Error Horizontal de Posición (HPE)	105
10.4. Histograma del Error Vertical de Posición (VPE)	106
10.5. Histograma del Índice Horizontal de Seguridad (HSI)	107
10.6. Histograma del Índice Vertical de Seguridad (VSI)	108
10.7. Diagrama Horizontal de Stanford	108
10.8. Diagrama Vertical de Stanford	109
10.9. Continuidad del servicio para aproximaciones LPV-200 según la localización	110
10.10. Disponibilidad del servicio para aproximaciones LPV-200 según la localización	111

Índice de tablas

4.1. Tipos de mensaje SBAS	42
9.1. Características del Club RC Chiva La Peñeta	86
9.2. Masas de los diferentes elementos y de sus pesos equivalentes	92
10.1. Errores HPE y VPE obtenidos y requeridos	106
11.1. Costes de personal	140
11.2. Costes de equipos y software	140
11.3. Desglose del coste total	141

Acrónimos y siglas

ABAS	Aircraft-Based Augmentation System
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AL	Alert Limit
AMCS	Alternate Master Control Station
APV	Approach Procedure with Vertical guidance
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Services
ASQF	Application Specific Qualification Facility
ATC	Air Traffic Control
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CCF	Central Control Facility
CDA	Continuous Descent Approach
CDDS	Commercial Data Distribution Service
CDMA	Code Division Multiple Access
CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000
CNS	Communication, Navigation and Surveillance
CPF	Central Processing Facility
CS	Commercial Service
DA/H	Decision Altitude/Height
DOP	Dilution Of Precision
DOT	Department of Transportation
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EDAS	EGNOS Data Access Service
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service

EOL	End Of Life
ESA	European Space Agency
ESSP	European Satellite Services Provider
EVLOS	Extended Visual Line Of Sight
EWAN	EGNOS Wide Area Network
FAA	Federal Aviation Administration
FAF	Final Approach Fix
FDE	Fault Detection and Exclusion
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FIZ	Flight Information Zone
FOC	Full Operational Capability
GA	Ground Antenna
GAGAN	GPS Aided GEO Augmented Navigation
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GCC	Ground Control Centers
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
GIC	GNSS/Ground Integrity Channel
GLONASS	GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSC	GNSS Service Centre
GSO	Geosynchronous Orbit
GSS	Galileo Sensor Stations
GUI	Graphical User Interface
HAL	Horizontal Alert Limit
HEO	Highly Elliptical Orbit
HMI	Hazardously Misleading Information
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level
HRM	Holistic Risk Model
HSI	Horizontal Security Index
IGSO	Inclined GeoSynchronous Orbit
ILS	Instrumental Landing System
IOC	Initial Operational Capability
IOV	In-Orbit Validation
IR	Integrity Risk
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System
ISRO	Indian Space Research Organization
IWG	Interoperability Working Group

JAXA	Japanese Aerospace Exploration Agency
JPO	Join Program Office
KP	Planetary K-index
LAAS	Local Area Augmentation System
LEO	Low Earth Orbit
LNAV	Lateral Navigation
LOC	Localizer (elemento perteneciente al sistema ILS)
LP	Localizer Performance
LPV	Localizer Performance with Vertical guidance
LT	Long-Term
MAPT	Missed Approach Point
MCC	Mission Control Centre
MCS	Master Control Station
MDA/H	Minimum Descend Altitude/Height
MEO	Medium Earth Orbit
MI	Misleading Information
MLS	Microwave Landing System
MS	Monitor Stations
MSAS	MTSAT Satellite Augmentation System
MTOM	Maximum Take-Off Mass
NAVIC	Navigation Indian Constellation
NDB	Non-Directional Beacon
NextGen	Next Generation Air Transportation System
NLES	Navigation Land Earth Station
NNSS	Navy Navigation Satellite System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPA	Non-precision Approach
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OS	Open Service
PA	Precision Approach
PACF	Performance Assessment and Checkout Facility
PBN	Performance Based Navigation
PL	Protection Level
PNT	Positioning, Navigation and Timing
PPP	Public-Private Partnership
PPS	Precise Positioning System
PRC	Pseudorange Correction
PRN	Pseudorandom Noise
PRS	Public Regulated Service
PS	Precision Service

QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RIMS	Ranging Integrity Monitoring Station
RNAV	aRea Navigation
RNP	Required Navigation Performance
RNSS	Radio Navigation Satellite Services
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RRC	Rangerate Corrections
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SA	Selective Availability
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level
SAR	Search and Rescue Service
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SBF	Septentrio Binary Format
SESAR	Single European Sky ATM Research
SI	Security Index
SIS	Signal In Space
SoL	Safety of Life
SORA	Specific Operation Risk Assesment
ST	Short-Term
SV	Space Vehicle
TAI	International Atomic Time
TTA	Time To Alert
TTC	Telemetry, Tracking and Control Stations
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ULS	Uplink Stations
UTC	Universal Time Coordinated
VAL	Vertical Alert Limit
VHF	Very High Frequency
VLOS	Visual Line Of Sight
VNAV	Vertical Navigation
VOR	VHF Omnidirectional Range
VPE	Vertical Position Error
VPL	Vertical Protection Level
VSI	Vertical Security Index
WAAS	Wide Area Augmentation System
WAD	Wide Area Differential

Documento I: Memoria

Capítulo 1

Introducción

La elección del presente Trabajo de Fin Grado obedece a una serie de motivos relacionados con el estado actual de la navegación por satélite, el auge de las aplicaciones con aeronaves no tripuladas y, por qué no, preferencias personales del autor, que serán presentados en este apartado. Asimismo, del tema se deriva un conjunto de objetivos que cumplir, que serán incluidos a continuación, junto con una breve presentación de la estructura del documento.

1.1 Preámbulo histórico

El ser humano encuentra en la aviación actual un medio de transporte masivo, extremadamente seguro, sin rival en media y larga distancia, hecho inconcebible si nos remontamos al origen de esta industria; aquel 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wilbur y Orville Wright no podían imaginar que aquel artefacto volador marcaría, con 12 segundos de vuelo y 40 metros de recorrido, el inicio de una de las industrias más prolíficas de la actualidad, de carácter global, puntero y tecnológico.

En los años posteriores, el desarrollo de estas máquinas permitió vuelos de mayor distancia y de forma más estable, con lo que el terreno de origen se perdía de vista; se hace necesario que el piloto amplíe sus funciones, sumando a la tarea de controlar la aeronave la de conocer su posición en todo momento. Surge

así la *navegación observada*, empleando referencias visuales como accidentes geográficos o puntos significativos, y apoyada posteriormente en instrumentos básicos como la brújula, el altímetro y el anemómetro. Incluyendo un reloj a bordo, se procedió a emplear la *navegación a estima*, mediante el recorrido de tramos con rumbo definido durante un tiempo determinado (técnica no exenta de errores tales como los debidos a los instrumentos, la técnica de pilotaje o el viento). Aplicando técnicas propias de la navegación marítima, la *navegación astronómica* también resultó de aplicación en el mundo aeronáutico, permitiendo hitos tales como el primer vuelo sin escalas a través del Atlántico. La misma emplea la observación de los astros mediante instrumentos específicos como el astrolabio o el sextante.

Los métodos previos resultan en un esfuerzo exigente por parte de la tripulación, haciendo necesaria la figura del *navegante* como aquella persona encargada específicamente de controlar el guiado y conocer la posición de la aeronave. Debido a este motivo, se hace necesaria la instalación de ayudas en tierra que faciliten el proceso de navegación. Así, inicialmente aparecen los aerofaros luminosos, formando una red de aerovías determinadas mediante haces luminosos directivos, y uno giratorio que transmitía el código de identificación del faro en cuestión. Los avances en el campo de las telecomunicaciones y la electrónica incentivan la aparición de la *radionavegación*, es decir, la determinación de la posición mediante el uso de señales radioeléctricas emitidas por estaciones terrestres. El uso de esta técnica y la infraestructura asociada (sistemas VOR, DME e ILS son ejemplos notables) resultan de actualidad, proporcionando un método de navegación seguro y ampliamente probado [1].

No obstante, el imparable avance de la industria aeronáutica y los diversos conflictos armados acaecidos a lo largo del siglo XX conllevan el incremento en el alcance y las prestaciones de las aeronaves, haciendo necesaria la creación de un sistema de navegación de carácter global. La idea de emplear un satélite artificial para la navegación, no obstante, se remonta a 1869 (*The Brick Moon*, por Edward Everett Hale); Arthur C. Clarke, escritor de ciencia ficción fue más allá, teorizando con el uso de un satélite de órbita geoestacionaria para telecomunicaciones, y proponiendo también un sistema de navegación por satélite en su artículo de 1945 publicado en *Wireless World*. Tras la invención de diversos sistemas de navegación basados en tierra (LORAN y OMEGA), aparece TRANSIT, el primer sistema de navegación basado en una constelación de satélites, en servicio desde 1965 y de carácter militar, que empleaba el desplazamiento Doppler en frecuencia de la señal para determinar la posición del receptor en tierra. Como inconveniente de este método, destaca que solo puede ser usado en navegación terrestre o marítima, al no poder proporcio-

nar medida de altitud. Los numerosos problemas del sistema TRANSIT (gran error de posicionamiento, acceso intermitente, largos tiempos de observación), junto con el desarrollo en paralelo de un sistema similar por parte de la URSS, motivó la imperiosa necesidad de un sistema revolucionario que dejase atrás a su competidor ruso, creándose así el NAVSTAR *Global Positioning System*, o simplemente GPS [2].

El empleo del sistema GPS como único medio de navegación resulta insuficiente, al no cumplir dicho sistema con las características de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad que establece la OACI, impulsora de la transición de los sistemas de navegación basados en radioayudas a los conocidos como GNSS. Esta organización establece dos etapas para la implantación de la navegación mediante GNSS:

- GNSS-1 (1998-2015). En esta primera etapa, se emplearán las constelaciones de satélites GPS y GLONASS, las cuales serán *augmentadas* mediante los conocidos como sistemas de mejora o aumentación.
- GNSS-2 (2015 en adelante). En la segunda fase, se trabaja en la creación de un sistema de navegación por satélite de carácter completamente civil, independiente de los sistemas ruso y americano.

Producto de la primera etapa surge el sistema de aumentación basado en satélite conocido como EGNOS, cuyo uso permite el empleo del sistema GPS como medio de navegación. El producto de la segunda fase es el sistema Galileo, el GNSS europeo puramente civil que permitirá la independencia del continente europeo en materia de navegación satelital[3]. En capítulos posteriores, se desarrollarán en detalle ambos sistemas, prestando especial atención a la descripción del sistema EGNOS y su uso en el entorno de la navegación aérea.

1.2 Motivación

Hoy en día, son innumerables los sectores de la industria y la sociedad que hacen uso de sistemas de posicionamiento mediante satélite, y las aplicaciones son igualmente variadas: sectores como el marítimo, ferroviario o de agricultura emplean las constelaciones de satélites para desarrollar sus servicios, gracias al avance y desarrollo de estos sistemas (mejorando la precisión y la disponibilidad) y el abaratamiento de los equipos de recepción. Por supuesto, el sector del transporte y, en particular el aéreo, se benefician enormemente de esta tecnología, permitiendo procedimientos más eficientes, mejor planificación de

las rutas y mayor productividad; el desarrollo del vehículo autónomo, tema de actualidad, depende en gran medida de los sistemas de navegación por satélite para asegurar una conducción segura y eficaz. Del mismo modo, las comunicaciones vía Internet o las transacciones bancarias son temporizadas mediante el uso de estos sistemas, que permiten obtener la precisión de un reloj atómico en cualquier parte del mundo [2].

La OACI, conocedora del potencial que presenta el posicionamiento mediante satélite, se encuentra actualmente a la cabeza de la implantación de diferentes sistemas de navegación global por satélite, en base a las etapas descritas en el apartado anterior, con el objetivo de desarrollar y validar estos sistemas, para finalmente sustituir las radioayudas actuales (asegurando, a lo largo del proceso, la coexistencia de ambos métodos), y hacer uso en su lugar de los GNSS; este movimiento es lógico, ya que las ventajas que presentan estos sistemas en el terreno de la navegación aérea son numerosas:

- Las prestaciones actuales de los sistemas son excelentes, cumpliendo con los requisitos de la navegación aérea.
- La capacidad del espacio aéreo y de los aeropuertos se verá aumentada, al estar las aeronaves capacitadas para volar rutas más directas y flexibles con mayor precisión.
- Asimismo, permiten la realización de aproximaciones y aterrizajes más eficientes, seguras y con un menor impacto medioambiental y ahorro de combustible.
- Suponen un ahorro en términos de infraestructura, en comparación con sistemas como el ILS, al no depender de costosas estaciones terrestres, y emplear un único equipo de a bordo para navegar a través del espacio aéreo de cualquier parte del mundo.

Sin embargo, como se ha explicado en el punto previo, los sistemas de posicionamiento mediante satélite operativos con anterioridad al desarrollo del sistema Galileo (GPS, GLONASS) no son aptos para la navegación, al no cumplir los estándares establecidos por la OACI. Se requiere, por tanto, un sistema denominado de aumentación, que asegure el cumplimiento de los requisitos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Los sistemas de aumentación existentes (ABAS, GBAS y SBAS) serán objeto de estudio de capítulos posteriores, perteneciendo el sistema EGNOS a la última categoría; el uso del mismo, posibilita, finalmente, la navegación por satélite mediante su servicio *Safety of Life*. Cabe destacar, como ejemplo de operación, la posibilidad de efectuar aproximaciones de precisión, conocidas como LPV-200 (basadas en

sistemas SBAS), las cuáles son equivalentes a una aproximación ILS de Categoría I. Se hacen visibles las numerosas ventajas de este tipo de operaciones, en comparación con su procedimiento homólogo basado en radioayudas.

La Figura 1.1 permite observar con detalle el estado de implementación de este tipo de operaciones en el territorio europeo:

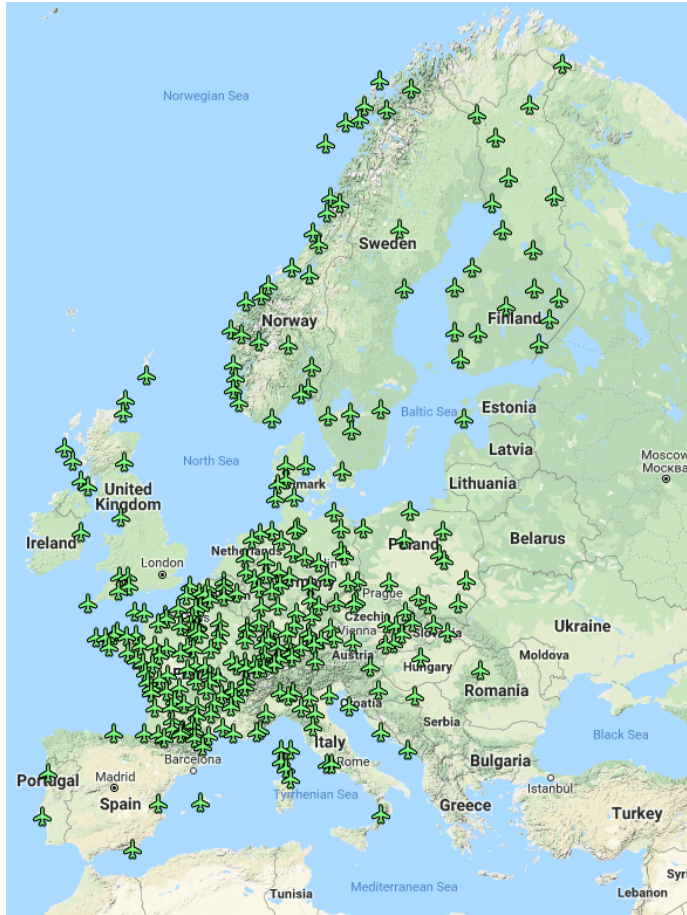


Figura 1.1: Implementación de operaciones LPV-200 a nivel europeo [4]

Los iconos de aeronaves en color verde indican aquellos aeródromos en los que es posible realizar aproximaciones basadas en sistemas SBAS, pudiendo obser-

varse que su implantación está muy extendida en el continente, especialmente en el centro de Europa (Alemania y Francia resultan ser ejemplos relevantes). En España, los aeropuertos de Málaga (GBAS) y Santander (SBAS) fueron los primeros en incorporar procedimientos basados en sistema de aumentación, obteniendo resultados satisfactorios que alientan el uso de estos procedimientos en otros aeropuertos, como Valencia y Palma de Mallorca (ya operativos) o Alicante (en proceso).

Resultando claros los motivos que llevan al desarrollo y empleo de los GNSS en la navegación aérea, resta ver el porqué de su aplicación en aeronaves no tripuladas. El sector de los RPAS o drones, cuyas diferentes denominaciones serán expuestas más adelante, experimenta en la actualidad un gran crecimiento, con un número cada vez mayor de usuarios y una gran variedad de aplicaciones. Entre ellas, sus posibles proyecciones en el mundo de la navegación aérea son abundantes, y resulta especialmente interesante su uso en aplicaciones de validación: la combinación de aproximaciones mediante sistemas aumentados por satélite (con el consecuente ahorro en infraestructura y mejora en la seguridad y eficiencia) y aeronaves no tripuladas (menor peso, mayor movilidad, menor coste operacional) podría suponer un cambio en la forma en la que estos procedimientos se validan. También son necesarios, vista la creciente demanda de estas aeronaves, procedimientos para que puedan operar en el espacio aéreo de manera legal y segura, basándose estos procedimientos en sistemas GNSS. El presente proyecto es, por tanto, una ventana hacia la unión de la navegación con las aeronaves no tripuladas, estableciendo un método novedoso, nunca antes probado, de validación y certificación.

1.3 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son:

- Repasar el estado del arte de los sistemas GNSS y de aumentación.
- Introducir la navegación basada en prestaciones (PBN) y la normativa actual en cuanto a aeronaves no tripuladas.
- Instalar un módulo receptor de señal GNSS en una aeronave RPAS.
- Completar la validación de la aproximación LPV-200 en la zona de Levante, mediante la recogida de datos en vuelo y su posterior procesado, determinando las prestaciones de la operación en términos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad.

Capítulo 2

GNSS

El término GNSS (del inglés *Global Navigation Satellite System* es el vocablo genérico para aquellos sistemas de navegación por satélite que proveen al usuario de posicionamiento geoespacial autónomo con cobertura global. Algunos de estos sistemas son el conocido como GPS, el sistema ruso GLONASS, la iniciativa europea Galileo o el proyecto chino Beidou [5]. En la literatura americana, estos sistemas reciben, en ocasiones, el nombre de sistemas PNT (*Positioning, Navigation and Timing*).

Los sistemas mencionados, a pesar de ser diferentes, comparten un alto grado de similitud a nivel de estructura y funcionamiento. De hecho, en todos ellos pueden diferenciarse tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuario [2]:

- Segmento espacial: El segmento espacial lo conforman los satélites o vehículos espaciales (SV) de la constelación, encargados de recibir la señal procedente del segmento de control, y enviar la señal de navegación a los equipos pertenecientes al segmento usuario.
- Segmento de control: También conocido como segmento terrestre, el segmento de control es el encargado de proceder con la monitorización y el control del sistema de navegación. Para ello, recolecta información de la

señal emitida por los satélites de la constelación y la procesa, para generar correcciones de diversos parámetros que son enviadas a los satélites.

- Segmento usuario: El segmento usuario engloba aquellos equipos de recepción de la señal de navegación; los mismos cuentan con una antena y un reloj, y su labor consiste en resolver las ecuaciones de navegación empleando los datos almacenados en la señal recibida para calcular la posición del receptor.

De los dos métodos más comunes para la determinación de la posición de un receptor, el empleo del desplazamiento en frecuencia de la señal (debido al efecto Doppler) se ha visto sustituido por la triangulación esférica. La posición de un usuario en el espacio (x, y, z) , conocida la distancia del mismo a un satélite de posición conocida, se hallará en la superficie de la esfera cuyo centro es el satélite, y de radio la distancia entre ambos elementos. Si se aplica dicho método a un conjunto de tres satélites, la posición del usuario vendrá determinada por la intersección de las tres superficies; únicamente dos puntos cumplirán tal condición, pudiendo descartarse uno de ellos atendiendo a la naturaleza del problema [3]. La situación anterior es aplicable en un escenario ideal, donde no se tienen en cuenta posibles errores relativos a la señal (propagación, refracción), al satélite (sincronización del reloj, determinación de la posición del SV) o al receptor (error multicamino, precisión del reloj).

Analizando dichos errores con mayor detenimiento, son varias las posibles fuentes de fallo que influyen en la señal enviada por las constelaciones de satélites, afectando al cálculo posterior. En primer lugar, debe tenerse en cuenta el error del reloj equipado a bordo del satélite, que a lo largo de un día puede sufrir desviaciones próximas a los 10 nanosegundos (cantidad que puede parecer ínfima a priori, pero resulta de importancia en términos de pseudorange), y que se corrige mediante modelos matemáticos calculados en tierra y que se envían al SV para que lo transmita al usuario como parte del mensaje de navegación. El error del reloj también surge debido a la diferencia de potencial gravitatorio entre un reloj en el espacio y otro en la superficie terrestre (relatividad general), y a la velocidad relativa entre ambos (relatividad especial). La posición real de los satélites, transmitida en el mensaje de navegación (efemérides), es un valor que incurre en un cierto error, puesto que en ocasiones deben interpolarse posiciones, o las mismas se ven alteradas debido a fenómenos de redistribución de masas, mareas o influencia de astros como el Sol; el segmento de control es el encargado de generar las correcciones necesarias para estas posiciones. La ionosfera y la troposfera tienen su efecto en la propagación de la señal GNSS, alterando su trayectoria y variando por tanto la distancia medida; sus efectos se mitigan comúnmente mediante modelos matemáticos de ambas capas de la

atmósfera, y su efecto es variable, dependiendo de la actividad solar, la hora del día o la humedad relativa. Por otro lado, existen errores asociados al receptor, como el error del reloj del usuario, el ruido presente en el mismo, o la propagación multicamino (por la que la señal se refleja en las superficies colindantes al receptor, recorriendo mayor distancia). Finalmente, la geometría de los satélites también influye en la solución del problema: un mayor grado de cercanía entre satélites puede originar una mayor zona de incertidumbre en la que situar al receptor, originándose esta reducción en la precisión meramente por la geometría de los SVs (término en inglés conocido como *Geometric Dilution of Precision*, GDOP).

En las siguientes secciones, se detallarán los diferentes GNSS existentes en la actualidad, incluyendo los servicios disponibles y sus características más relevantes. Adicionalmente, se prestará especial atención al sistema GPS (sección 2.1), base del proceso de navegación que atañe a este proyecto. Para terminar, se hablará brevemente de los sistemas de navegación regionales y su impacto actual.

2.1 GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el primer sistema de navegación por satélite en entrar en funcionamiento, y el más longevo de todos los actuales. Operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, es actualmente accesible a cualquier usuario, tras una época marcada por la interferencia deliberada del gobierno en la calidad de la señal, evitando su uso por parte de otras naciones (fenómeno conocido como Disponibilidad Selectiva, SA). El sistema provee de dos servicios: el Servicio de Posicionamiento de Precisión (PPS), y el Servicio de Posicionamiento Estándar, estando el primero encriptado, impidiendo su uso civil, y proporcionando una mayor precisión.

2.1.1 Proceso de desarrollo

El GPS actual es el resultado de un proceso de desarrollo de más de 20 años, con varios predecesores, entre los que se encuentran los antiguos sistemas de navegación por señales radioeléctricas como LORAN y OMEGA. Además, tres sistemas resultaron ser clave en el desarrollo del GPS.

El primer sistema de navegación basado en satélite comenzó a operar en 1964 y recibió el nombre de TRANSIT o Sistema de Navegación por Satélite Marítimo

(NNSS), y consistía en la medición del desplazamiento Doppler de un tono a la frecuencia de 400 MHz emitido mediante un conjunto de satélites de órbita polar de baja altitud. Siendo una primera aproximación a estos sistemas, la resolución de la posición del usuario requería conocer la posición del satélite y la altitud del receptor, con lo que su uso en aplicaciones aéreas resultaba inviable, resultando de gran utilidad para los submarinos estadounidenses. Igualmente, la disponibilidad de la señal no era continua, existiendo períodos de hasta 100 minutos en los que la señal no era accesible. La creación de TRANSIT permitió demostrar la excelente fiabilidad de los sistemas espaciales, así como estudiar diferentes algoritmos de predicción de utilidad futura.

En 1972, se puso en marcha el segundo de los sistemas basados en satélite que contribuirían al desarrollo del actual GPS, conocido como *Timation*. El mismo es desarrollado con el objetivo de obtener mediciones de gran precisión del tiempo en diversos puntos del globo terráqueo. Para ello, se equiparon los diferentes satélites con osciladores de cuarzo, que pronto fueron sustituidos en los nuevos satélites por relojes de rubidio y cesio, de mayor estabilidad, permitiendo mediciones de mayor exactitud de las órbitas de los satélites. El tercer satélite de este sistema sirvió, asimismo, como demostrador de la tecnología que sería usada en el GPS; de la misma forma, el trabajo realizado en la creación del estándar temporal fue una base de gran importancia para el sistema venidero.

El tercer elemento de este conjunto fue el programa 621B de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. En particular, este programa probó el uso de señales basadas en ruido pseudoaleatorio (PRN), empleando un tipo de modulación basado en una secuencia digital de bits aleatorios, fácil de generar y almacenar, y que podía ser interceptada por el usuario para encontrar el inicio de la misma y hallar la distancia al satélite en cuestión. El uso de estos códigos, ortogonales entre sí, permitía a los satélites transmitir en la misma frecuencia nominal sin interferir entre ellos, protegiendo también a la señal de interferencias deliberadas. Empleando la misma secuencia de manera invertida, se formaba un canal de comunicación por el que transmitir información del reloj y las efemérides.

Tras la aparición de estas bases, en 1973 se creó la Oficina de Programas Conjuntos (JPO), encargada de desarrollar los proyectos anteriores debido a su similitud. El programa recibió el nombre de NAVSTAR o GPS, siendo ambos aceptados. En 1973 se intentó la aprobación del sistema, que fue rechazada, obligando al equipo a cargo a reelaborar la concepción del sistema. De dicha reunión, se llegó a la conclusión de que la mejor solución pasaba por sintetizar los sistemas previos en uno solo, que permitiera explotar al completo las capa-

ciudades individuales de cada uno. En diciembre de ese mismo año, se dio luz verde al proyecto [6].

Los objetivos iniciales del sistema pueden observarse hoy en día, resultando ser el GPS una mejora en todos los aspectos con respecto al sistema TRANSIT: ofrecer un sistema global, empleable en cualquier parte de la Tierra, en todo momento, sin importar las condiciones meteorológicas, mediante receptores pequeños y portables de precio reducido. De gerencia militar, el sistema se abrió al público civil tras el derribo del vuelo 007 de Korean Airlines por parte de la Unión Soviética en 1983. En 1978 se lanzó el primer satélite de la constelación, entrando el sistema en fase inicial con 24 satélites en 1993, y en fase final en 1995 con la compleción de la constelación. La señal accesible por el segmento civil era intencionalmente degradada (SA) hasta el año 2000, cuando el presidente Bill Clinton dictaminó que la misma no se aplicaría en adelante [7].

2.1.2 Segmentos del sistema

Como se ha descrito anteriormente, tres son los segmentos que conforman el Sistema de Posicionamiento Global.

El segmento espacial consiste de un mínimo de 24 satélites en seis planos orbitales igualmente espaciados, con una inclinación de 55° con respecto al ecuador y a una altitud de 20200 kilómetros (órbitas MEO), con lo que cada satélite orbita la Tierra dos veces al día (12 horas sidéreas). Con cuatro satélites por plano, se consigue que un mínimo de cuatro vehículos sean visibles desde cualquier punto del planeta, siendo observables comúnmente entre siete y ocho, y requiriendo al menos cuatro para resolver la posición del receptor. En cada plano existe un hueco adicional para albergar un quinto satélite, pudiendo llegar la constelación a contar con 30 SVs.

El segmento de control es el encargado de monitorizar y controlar los parámetros orbitales, el estado de los diferentes vehículos, la actualización del mensaje de navegación, el seguimiento de los satélites y la resolución general de problemas. Para todo ello, cuenta con cuatro subsistemas: la Estación de Control Maestra (MCS), localizada en Colorado Springs y el nodo central de control de la constelación, la Estación de Control Maestra Alternativa (AMCS), la red de Antenas de Tierra (GAs), que actúan de enlace de subida a los satélites, y la red de Estaciones de Monitorización (MSs) distribuidas por toda la superficie terrestre, que recogen información procedente de la constelación y la envían a la MCS para que procese los datos correspondientes.

El segmento de usuario engloba todos aquellos receptores de la señal GPS, capaces de recibir la señal y decodificarla, obteniendo su posición. Los mismos han evolucionado con el tiempo, reduciendo su peso y tamaño, incorporando nuevas funciones y la posibilidad de integrar la señal de otros sistemas, así como el rango de aplicaciones de uso.

2.1.3 *Funcionamiento del sistema*

En la introducción al capítulo se plantea la resolución geométrica del problema de posicionamiento de manera sencilla, pero el funcionamiento del GPS, así como del resto de GNSSs, resulta más complejo, y engloba ciertos parámetros de error no presentes en un escenario ideal.

El GPS resulta una herramienta de medida del tiempo de gran precisión, gracias a los relojes atómicos que incorpora cada uno de los satélites. Estos relojes, usualmente de cesio, funcionan exponiendo átomos de este material a energía de microondas hasta que vibren, para medir dicha frecuencia de vibración, de gran estabilidad, y emplearla como medida de tiempo. Este método de medición permite definir con gran precisión la unidad del segundo, estableciendo así el Tiempo Atómico Internacional (TAI), base del Tiempo Universal Coordinado (UTC). El tiempo TAI resulta, a su vez, una media de 200 relojes repartidos por el planeta, ya que la gravedad afecta a la medida del tiempo (teoría de la Relatividad General y Especial).

La medida del tiempo resulta de gran importancia al conocer el método por el que se obtiene la posición del usuario. El sistema dispone de dos códigos diferentes, uno para cada servicio. El código de Precisión (P) corresponde al servicio PPS, mientras que el código *Coarse Acquisition* (C/A) es el empleado en el servicio estándar, y en el que se profundizará. La señal civil proporcionada por el GPS consiste en una señal continua de 1023 bits en banda L1 (1575.42 MHz), transmitida a una velocidad de 1023 Mb por segundo, con lo que se repite cada milisegundo. Esta señal contiene el código pseudoaleatorio descrito anteriormente (PRN), transmitiendo cada satélite un código único que el usuario puede discernir gracias al acceso mediante división de código (CDMA), en el que se codifican el mensaje de navegación con los datos de efemérides, y el almanaque (datos del resto de satélites) a 50 bits por segundo. Una vez recibida la señal, el receptor emplea su copia del mismo código PRN y establece la diferencia de tiempo entre ambas partes del código. Por tanto, sabiendo con gran exactitud el tiempo en que el mensaje fue emitido por el satélite (posible gracias a los relojes atómicos), el tiempo en que es recibido (estimable con gran precisión gracias a las medidas del resto de satélites) y la velocidad de

propagación de la señal (coincidente con la velocidad de propagación de la luz en el vacío), puede calcularse la distancia del satélite en cuestión al receptor, obviando nuevamente diferentes fuentes de error.

Obtenidas las pseudodistancias del receptor a un mínimo de cuatro satélites, se procede con la resolución de las ecuaciones de navegación, y se calcula la posición del mismo en el sistema de coordenadas con origen en el centro de masa de la Tierra, y fijo con la misma (ECEF). Su eje x cruza el planeta por el punto de latitud y longitud 0, el eje z está alineado con el Polo Internacional de Referencia, y el eje y es perpendicular a ambos. Como sistema de referencia se utiliza el elipsoide WGS84, establecido en 1984 y estándar actual en cartografía, geodesia y navegación.

2.2 GLONASS

GLONASS es el Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS) de gerencia rusa capaz de proveer al usuario con un servicio de posicionamiento, navegación y temporización fiable de manera continua y gratuita. Los receptores de la señal del sistema GLONASS calculan su posición empleando un sistema de referencia propio (PZ-90) mediante triangulación [8]. Operado por el Ministerio de Defensa de la Federación Rusa, es similar en diseño y operación al GPS americano, con algunas diferencias.

La historia de este sistema de navegación es cuanto menos accidentada: tras la creación del sistema conocido como *Cicada*, que constaba de cuatro satélites en órbitas circulares de 1000 km con inclinación de 83° , los primeros test del sistema GLONASS tuvieron lugar en 1982. La disolución de la Unión Soviética en 1991 supuso la continuación del sistema por parte de la Federación Rusa, que lo declaró operativo en 1993 y desarrolló la constelación de satélites hasta dotarla de 24 unidades en 1995. Sin embargo, el colapso de la economía rusa supuso una notable reducción del presupuesto destinado a la industria espacial, relegando el proyecto en el olvido hasta principios del siglo XXI, cuando la restauración del sistema se convirtió en prioridad del gobierno dirigido por Vladimir Putin. En mayo de 2007, se decretó el acceso gratuito y sin limitaciones de cualquier usuario a la señal procedente del sistema GLONASS, manteniendo la componente militar encriptada.

El sistema GLONASS consta, de manera similar al sistema GPS, de tres segmentos:

- El segmento espacial cuenta con 24 satélites repartidos en 3 planos orbitales, cuyos nodos ascendentes se encuentran espaciados 120° . Esto conlleva una distribución de 8 satélites por plano, espaciados 45° . Las órbitas son circulares, con una inclinación de 64.8° y a una altitud de 19130 km, siendo recorridas por los satélites en un período de 11 horas y 15 minutos aproximadamente. Las frecuencias principales son la G1 (1.6 GHz) y la G2 (1.25 GHz), y la multiplexación se realiza en frecuencia (FDMA), al contrario que la realizada por el sistema GPS en código.
- El segmento de control incluye un Centro de Control de Sistema y toda una red de Estaciones de Comando y Seguimiento localizadas a lo largo de todo el territorio ruso, mientras que varias estaciones externas se ubican en Brasil, Nicaragua y la Antártida.
- El segmento usuario lo conforman los receptores capaces de calcular su posición, velocidad y tiempo a partir de la señal GLONASS. Cada vez son más los modelos de teléfono inteligente que incorporan receptores aptos para este sistema, permitiendo la interoperabilidad de GPS y GLONASS, permitiendo mayor precisión y correcciones más rápidas.

GLONASS ofrece actualmente dos servicios. El Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), también conocido como Servicio de Señal de Precisión Estándar, es un servicio de posicionamiento abierto, sin coste alguno, con cobertura global. El mismo opera en las bandas G1 y G2 de frecuencia. Por otra parte, el Servicio de Posicionamiento de Precisión (PPS), o Servicio de Señal de Alta Precisión, se encuentra restringido al ámbito militar y usuarios autorizados. Opera mediante dos señales en las bandas G1 y G2.

Mejoras importantes se encuentran planeadas con el objetivo de modernizar el sistema, incluyendo frecuencias adicionales y mayor compatibilidad con otros sistemas, como el reciente Galileo.

2.3 Galileo

Galileo es el nombre que recibe el sistema GNSS de origen europeo, con el objetivo de garantizar un medio de posicionamiento de alta precisión bajo control civil (a diferencia de sus homólogos ruso, americano o chino) [9].

En la época de los 90, la Unión Europea vio la necesidad de operar su propio sistema de navegación por satélite, sabedora del control militar ejercido por el Departamento de Defensa estadounidense sobre el GPS y la posibilidad

del mismo de alterar la señal o limitar el acceso del resto del mundo al uso de este medio de posicionamiento; de igual manera ocurre con los sistemas BeiDou o GLONASS, no pudiendo permitir que la sociedad europea actual, tan dependiente de la navegación por satélite, se viese privada del acceso a esta tecnología. Así, la Comisión Europea y la ESA unieron fuerzas para dar vida al proyecto Galileo, teniendo en mente la creación de un sistema independiente, civil e interoperable con el resto de constelaciones, aumentando así las prestaciones ofrecidas en materia de precisión, disponibilidad, integridad y continuidad. El proyecto se estructura en tres fases: Validación en órbita (IOV), Capacidad Inicial de Operación (IOC) y Capacidad Operacional Total (FOC), encontrándose el sistema actualmente en la segunda fase, a la espera de completar la constelación de satélites y proporcionando servicios básicos a las autoridades públicas desde diciembre de 2016.

El segmento espacial correspondiente al sistema Galileo es el encargado de almacenar y retransmitir el mensaje de navegación emitido por el segmento de control, empleado por el segmento usuario para calcular su posición. En el momento en que el proyecto entre en fase FOC, los 30 satélites de la constelación se encontrarán operativos en órbitas MEO (existiendo 3 planos orbitales), con una inclinación de 56° con respecto al Ecuador, a una altitud de 23222 kilómetros y con un período orbital de 14 horas. Cada satélite se equipará con dos relojes diferentes (rubidio e hidrógeno), permitiendo una fuente de referencia temporal de gran estabilidad.

El segmento de control se encarga, por otra parte, de la correcta operación del sistema. Mediante el mismo, se monitoriza y corrige la configuración de la constelación de satélites, se predicen los datos de relojes y efemérides, se mantiene el marco de referencia temporal y se actualizan los mensajes de navegación de cada satélite. Este proceso es posible gracias a los dos Centros de Control de Tierra (GCC), las cinco estaciones de Telemetría, Seguimiento y Control (TTC), las Estaciones de Enlace de subida (ULS), la red global de Estaciones Sensor Galileo (GSS) y el Centro de Servicios GNSS europeo (GSC).

En cuanto al segmento de usuario, el mismo lo determinan las pseudodistancias (junto a otros observables) para resolver las ecuaciones de navegación y obtener las coordenadas del usuario, proporcionando gran exactitud en la medida temporal.

Finalmente, Galileo cuenta con gran variedad de servicios que lo diferencian del resto de sistemas de navegación:

- Servicio Abierto (OS): Este servicio permitirá a cualquier usuario con un receptor adecuado establecer su posición, velocidad y referencia temporal sin necesidad de autorización y libre de pago. El Servicio Abierto podrá emplearse para navegación, o para usuarios que requieran mayor precisión mediante su combinación con técnicas de aumentación o el uso de la señal GPS (si bien, no se ofrecerá monitorización de la integridad), por lo que se asegurará la calidad de la señal recibida.
- Servicio Comercial (CS): El Servicio Comercial de Galileo se orienta a aquellas aplicaciones de mercado que requieran mayor precisión que la proporcionada por el Servicio Abierto, empleando una combinación de dos señales encriptadas, añadidas a las señales ya disponibles mediante el OS, y accesibles a cambio del pago de una tarifa. La precisión obtenible rondaría el centímetro, y como ventaja operacional dispone de cobertura global.
- Servicio Público Regulado (PRS): Este servicio está destinado a aplicaciones y usuarios autorizados por las diferentes instituciones civiles de los estados; cuerpos como la policía, agentes de aduanas o guardacostas podrán beneficiarse de este sistema encriptado, disponible en cualquier circunstancia, y que proporciona una señal robusta e inmune a los fenómenos de interferencia deliberada (*jammimg*) o suplantación de identidad (*spoofing*). Cada estado nombrará una autoridad responsable de este servicio, que se encargará de controlar los usuarios del servicio, así como las aplicaciones que lo emplean y la fabricación de los receptores correspondientes.
- Servicio de Búsqueda y Rescate (SAR): El servicio que propone Galileo en materia de salvamento y rescate es el aporte europeo al programa internacional COSPAS-SARSAT, cuyo objetivo es proveer con información precisa y fiable de localización y alerta a las autoridades de rescate en situaciones de peligro o emergencia mediante un conjunto de radiobalizas, estaciones de control, centros de mando e instrumentos a bordo de los satélites [10]; en concreto, la constelación de satélites MEO prestará servicio junto a los satélites LEO y GEO existentes, creando el sistema MEOSAR, permitiendo mayor precisión en la localización, mayor disponibilidad y detección en tiempo real de mensajes de rescate transmitidos en todo el globo.
- Monitorización de integridad: Las señales OS contribuirán a monitorizar la integridad de las señales de navegación en aplicaciones SoL, cumpliendo con los estándares internacionales.

Para proporcionar estos servicios, el sistema Galileo cuenta con cuatro bandas de frecuencia, todas ellas ubicadas en el espectro reservado para los Servicios de Radionavegación por Satélite (RNSS). Asimismo, tres de ellas se localizan en el espectro destinado a los Servicios de Radionavegación Aeronáutica (ARNS), utilizados por usuarios del sector de la aviación civil en aplicaciones donde prima la seguridad.

2.4 BeiDou

El Sistema de Navegación por Satélite BeiDou (BDS), también conocido como BeiDou-2, es el sistema de navegación por satélite chino de segunda generación que será capaz de proveer posicionamiento, navegación y servicios de temporización de forma global [11].

Tras la invitación por parte de la Unión Europea a China para formar parte del proyecto Galileo y su posterior expulsión, el gobierno del gigante asiático comenzó el desarrollo de un sistema de navegación propio e independiente, que comenzó a operar en 1999. La primera fase del proyecto (de nombre BeiDou) consistía de 3 satélites, y fue ampliándose hasta el lanzamiento del sistema BeiDou-2 o Compass en 2006; en 2011, comenzó a proporcionar servicios básicos de posicionamiento y navegación en toda la región de Asia y el Pacífico, y se espera su funcionamiento completo (FOC) en 2020.

Siguiendo el esquema general de los GNSS, el sistema BeiDou consta de los tres segmentos establecidos. Se espera que, cuando el sistema se encuentre plenamente operativo, cuente con un segmento espacial formado por 27 satélites en órbita MEO, 3 en órbita IGSO y 5 en órbita GEO, proporcionando así cobertura mundial y un sistema de aumentación SBAS que formará parte integral del sistema [2]. El segmento de control constará de una Estación Maestra de Control (MCS), y varias estaciones de subida y monitorización. En el segmento de usuario, los receptores emplearán la señal de los satélites (accediendo a ella mediante CDMA) para calcular las pseudodistancias y otros observables y obtener las coordenadas empleando un sistema de coordenadas propio (CGCS2000); asimismo, podrán hacer uso de las señales provenientes de otros GNSS.

BeiDou proporcionará servicios tanto globales como regionales:

- Servicio Abierto (*Open Service*): Similar a los ofrecidos por GPS y Galileo, de ámbito global y gratuito. Los usuarios del mismo serán capaces de

obtener precisiones de 10 m, 50 ns y 0.2 m/s para la posición, tiempo y velocidad respectivamente.

- Servicio Autorizado (*Authorized Service*): Salvo que el mismo proporciona cobertura global, se dispone de escasa información sobre este servicio, aunque se asegura su uso fiable incluso en "situaciones complejas".
- Servicios diferenciales de área extensa: Los mismos proporcionarán precisión de hasta 1 m gracias a las 30 estaciones previstas transmitiendo correcciones a los satélites GEO, logrando así Categoría I en el área regional de cobertura.
- Servicio de mensajes cortos: También llamado Servicio de Informe de Posicionamiento, permite, de forma regional, que los usuarios puedan enviar mensajes de texto (actualmente con un límite de 120 caracteres chinos), pudiendo evolucionar hacia un servicio de mensajería con un límite de caracteres mayor y sin bloqueo regional.

2.5 Sistemas regionales

Los sistemas regionales, como bien indica su nombre, proporcionan posicionamiento y guiado en regiones concretas de nuestro planeta; no pueden denominarse, por ende, GNSS, pero se incluyen en este apartado debido a las numerosas similitudes que los mismos guardan con los sistemas de navegación global por satélite.

2.5.1 NAVIC o IRNSS

El Sistema Indio de Navegación Regional por Satélite (IRNSS) es un sistema de navegación por satélite de ámbito regional, que abarca parte del territorio asiático y es operado por el gobierno del país hindú [12].

El proyecto de GNSS comenzado por China catalizó la creación del sistema de navegación hindú independiente en 2006, en vistas a un sistema con cobertura asiática y no global. Desarrollado por la Organización de Investigación Espacial India (ISRO), el primer satélite de la constelación fue lanzado en julio de 2013, y la constelación se completó en abril de 2016 tras el lanzamiento con éxito del séptimo satélite, momento en que fue renombrada como Constelación de Navegación India (NAVIC) por el primer ministro del estado.

El sistema NAVIC se encuentra bajo control completo de la India, y proporciona sus servicios en un área de aproximadamente 1500 kilómetros alrededor del país. El segmento espacial está formado por 7 satélites, de los cuales 3 son satélites GEO, mientras que los 4 restantes son satélites GSO con una inclinación de su órbita de 29°; su uso se justifica al tener como objetivo la reducción del DOP empleando el mínimo número de satélites y manteniendo línea de visión constante entre las estaciones de control y los vehículos. El segmento de control o de tierra está compuesto por diferentes centros y estaciones de control, encargados de la red de comunicación, el enlace de subida, la temporización, las correcciones ionosféricas y del reloj y los cálculos de posición e integridad. El segmento de usuario lo comprenden todos aquellos receptores con capacidad de recibir en bandas L5 y S y de manejar correcciones ionosféricas, siendo compatibles con el resto de sistemas de navegación existentes.

El sistema NAVIC presenta actualmente dos servicios: el Servicio de Posicionamiento Especial (SPS), gratuito y disponible para todos los usuarios, y el Servicio de Precisión (PS), solo para usuarios autorizados. Ambos operarán en las bandas de frecuencia L5 y S, y permitirán obtener medidas con un error de aproximadamente 20 metros en la región oceánica de la India (al límite de los 1500 kilómetros), valor que podría reducirse hasta los 10 metros en ubicaciones menos limítrofes con cobertura GSO.

2.5.2 QZSS

El Sistema Satélite Casi-Cenital (QZSS) es un sistema de navegación por satélite de ámbito regional comisionado por el gobierno de Japón y desarrollado por la Agencia de Exploración Espacial Japonesa (JAXA). Su cobertura abarca la zona este de Asia y la región de Oceanía, y permite emplear las señales procedentes de otros GNSS como GPS o Galileo.

Autorizado para su desarrollo en 2002, el proyecto ha pasado por las manos de empresas como Mitsubishi Electric Corp., Hitachi Ltd. y GNSS Technologies Inc. bajo el grupo ASBC hasta su colapso en 2007, cuando JAXA se hizo cargo del mismo. La fase inicial del proyecto actual comenzó en septiembre de 2010 con el lanzamiento del primer satélite, conocido como Michibiki. Los exitosos resultados de los estudios realizados con estos satélites, demostrando la mejora en el error de posicionamiento mediante el uso conjunto de los sistemas GPS y QZSS, permitieron al gobierno acelerar el desarrollo del programa para obtener una constelación de 4 satélites, que espera ampliarse en un futuro cercano hasta contar con 7 satélites.

El segmento espacial está conformado por 3 satélites ubicados en órbitas altamente elípticas (HEO), y un cuarto vehículo en órbita GEO. El nombre del sistema se debe a que siempre se puede hallar uno de los 3 satélites de órbita HEO en el zenit (punto del hemisferio celeste situado sobre la vertical del observador) de Japón, lo que implica encontrar alguno de los satélites con una inclinación superior a los 70° durante más de 12 horas. De este modo, se soluciona uno de los problemas inherentes al uso del sistema GPS en zonas de gran densidad urbana como Tokyo y otras urbes japonesas; la gran concentración de edificios de grandes dimensiones favorece el efecto de interferencia multicamino (*multipath*, por la cual la señal GNSS se refleja en las fachadas y objetos, viajando mayor distancia e introduciendo error en la medida de la pseudodistancia [2]. Por otro lado, el segmento terrestre cuenta con estaciones de control maestras, de control y seguimiento, de medida láser y de monitorización, emplazadas en lugares diversos como Bangalore, Canberra o Hawaii. En cuanto al segmento de usuario, existen aplicaciones en sectores como la agricultura de precisión, construcción, gestión de flotas, y por supuesto transporte. Los servicios de los que dispone el sistema QZSS son los siguientes:

- Servicio de posicionamiento Satélite (*Satellite Positioning Service*): Permite el empleo de la señal GPS en zonas urbanas y montañosas.
- Servicio de Aumentación Submétrico (*Sub-Meter Level Augmentation Service*): Provee posicionamiento de precisión con un error cercano a los 2 metros.
- Servicio de Aumentación Centimétrico (*Centimeter Level Augmentation Service*): De mayor precisión, proporcionará al usuario la resolución de su posición proporcionando errores menores al metro, estimados en torno a los 10 centímetros.
- Servicios de Tecnología de Verificación de Posición (*Position Technology Verification Services*): Permite realizar pruebas con nuevas tecnologías de posicionamiento en desarrollo.
- Servicio de Envío de Mensajes Cortos (*Short Message Delivery Service*): Orientado a situaciones de desastre y operaciones de rescate, permitirá informar a la población mediante mensajes de alerta.

El sistema empleará, para proporcionar estos servicios, hasta 6 señales diferentes en combinación con las señales del resto de sistemas de navegación, aumentando la precisión y fiabilidad del conjunto; cuenta, asimismo, con un sistema de temporización que no requiere de relojes atómicos emplazados en los satélites, permitiendo reducir la complejidad y el coste de los mismos.

Capítulo 3

Sistemas de aumentación

Los sistemas de navegación actuales permiten, como se ha explicado, hallar la posición de un receptor con un cierto grado de precisión, permitiendo el empleo de esta tecnología en aplicaciones de diversa índole. No obstante, existen campos de uso en los que las prestaciones de estos sistemas no son suficientes para garantizar los requisitos operacionales, como ocurre con la navegación aérea: la OACI establece criterios de precisión que deben mantenerse durante cada fase del vuelo, y que no se obtienen empleando, por ejemplo, el GPS como único medio de navegación. De igual forma, es necesario asegurar que el sistema estará disponible durante el proceso, asegurando su uso continuado y, sobre todo, fiable. Surgen así los conceptos de integridad (fiabilidad de la señal), disponibilidad y continuidad, que serán tratados a continuación, pero que hacen necesario complementar los GNSSs con información adicional. Finalmente, la existencia de la SA propició la creación de métodos que eliminasen esta interferencia, permitiendo el uso de la señal GPS.

Es así como aparecen los sistemas de aumentación para sistemas de navegación mediante satélite, proporcionando un método para integrar información externa en el proceso de cálculo y mejorar así los atributos antes mencionados. Dependiendo de la fuente de la que se extraiga la información, se puede clasificar a estos sistemas en tres categorías diferentes. Igualmente, tal información puede ser relativa a las fuentes de error (desviaciones del reloj, efemérides, retardo ionosférico), puede indicar el grado de desviación de la señal de nave-

gación con respecto a los valores reales de posición, o proporcionar datos que integrar en la resolución de las ecuaciones [13].

En este capítulo, se abordará la definición formal de los requerimientos operacionales introducidos, estrechamente relacionados con los sistemas de aumentación, y posteriormente se ofrecerá una clasificación de estos sistemas en tres grupos; el último de ellos (Sistemas de Aumentación Basados en Satélite, SBAS) es fundamento de todo el proyecto, y su desarrollo completo correrá a cargo del siguiente capítulo.

3.1 *Performance* GNSS

Cuando se habla de la *performance* (traducido literalmente como "desempeño o actuación") de un sistema GNSS, la misma se mide en términos del error proporcionado en la solución del problema (precisión), y la franja de tiempo en la que el sistema se encuentra disponible para su uso (disponibilidad). No obstante, en aplicaciones como la navegación marítima o aérea, resulta igual de importante asegurar que la información recibida es correcta, y que durante ciertas fases de la navegación se asegure que el sistema funcione de manera ininterrumpida, ya que el cese del mismo en dichas fases podría suponer daños a personas o bienes: se habla, pues, de integridad y continuidad. Como se verá más adelante, la comunidad de aviación civil ha trabajado en la estandarización de estos parámetros y su determinación en base al tipo de operación, especificando la *Performance* Requerida de Navegación (RNP) que un sistema de navegación aérea debe cumplir [14].

Los cuatro parámetros en cuestión son los siguientes:

3.1.1 *Precisión*

La precisión de una determinada medida o estimación de la posición de un móvil, en un instante dado, es el grado de conformidad que presenta tal medida o estimación con el valor real de la posición; de otra forma, es la diferencia entre la medida y el valor real.

La naturaleza estadística de este parámetro implica que el mismo debe expresarse en términos estadísticos, como la probabilidad de que el error en la medida no supere cierto valor con un grado determinado de probabilidad. Los métodos más comunes para expresar la precisión son:

- Percentil x ($x\%$): Implica que el $x\%$ de las posiciones calculadas o medidas tendrán un error menor o igual al valor de precisión establecido. Valores típicos son 50 %, 67 % o 95 %.
- Valor Cuadrático Medio (rms): La raíz cuadrada de la media del error al cuadrado permite obtener la media de los errores, asumiendo que los mismos siguen una distribución normal.
- x sigma ($x\sigma$): Cada unidad de sigma corresponde con una unidad de desviación estándar.

3.1.2 Integridad

La integridad es la medida de la confianza que puede depositarse en la corrección de la información proveniente de un sistema de navegación. La definición incluye la capacidad del sistema de proporcionar al usuario alertas periódicas en aquellos momentos en los que el sistema no deba emplearse para la navegación.

Los términos de integridad y precisión no deben confundirse a la hora de aplicarlos a los requerimientos de una operación en concreto. Ambos se pueden expresar en forma de porcentaje, pero el primero es más restrictivo que el segundo. En aviación civil, se suele establecer un valor de precisión con una probabilidad del 95 % (asegurando que tal porcentaje de las medidas mostrarán un error igual o menor al valor especificado), mientras que el percentil aplicable para la integridad es superior, rozando la totalidad (p. ej. 99.999 %). Los requerimientos de integridad también involucran el empleo de alarmas para alertar al sistema de cuándo su uso puede ser arriesgado, hecho que no se exige en los requerimientos de precisión. Se entiende la integridad, pues, como un conjunto de barreras empleado para proteger al sistema y a la operación de eventos de riesgo.

Para concretar con más detalle este parámetro, se definen cuatro conceptos auxiliares mediante los cuales es posible profundizar en el entendimiento de este concepto:

- Límite de Alerta (AL): El límite de alerta para la medida de un parámetro es el error de tolerancia que no debe excederse sin emitir una alerta. Si se sobrepasa ese valor, el sistema debería declararse no disponible para la aplicación. Se establece un Límite de Alerta Horizontal (HAL), y un Límite de Alerta Vertical (VAL).

- Tiempo para Alerta (TTA): El tiempo para alerta es la máxima ventana temporal acontecida desde que el sistema incumple la tolerancia impuesta hasta que el equipo emite la alerta. Para las estadísticas de integridad (empleadas durante la certificación de sistemas embarcados), solo se tienen en cuenta aquellos eventos de integridad que tengan lugar durante un tiempo mayor al TTA sin emitir alerta alguna.
- Riesgo de Integridad (IR): Probabilidad de que, en cualquier momento dado, el error de posición exceda el límite de alerta, sin advertir el usuario que se encuentra fuera del TTA, incumpléndose por tanto el criterio de integridad.
- Nivel de Protección (PL): Límite estadístico calculado para garantizar que la probabilidad de que el error absoluto de posición supere el error límite sea menor o igual que el riesgo de integridad puesto como objetivo. Se obtiene mediante las desviaciones típicas de los datos obtenidos, mostrando su fiabilidad.

Una definición más clara se detalla estableciendo el Nivel de Protección Horizontal (HPL) y el Nivel de Protección Vertical (VPL). El HPL es el radio de un círculo en el plano horizontal, con su centro en la posición verdadera de la aeronave, que describe la región en la que se asegura que se halla la posición horizontal del móvil. El VPL es la mitad de la longitud de un segmento vertical, con su centro en la posición verdadera de la aeronave, que engloba la región donde es seguro encontrar el móvil [15].

Finalmente, el sistema debe deshabilitarse cuando el nivel de protección (PL) supera el nivel de alerta (PL), siendo este punto de inflexión en el que la información deja de ser fiable.

En el momento en que un evento de integridad (como la emisión de una alerta) tiene una duración mayor que el TTA, sin haber producido ningún aviso antes de cumplirse este tiempo, se habla de un fallo de la integridad (*integrity failure*). Para determinar el estado de un sistema en base a los conceptos anteriores, se emplea el Diagrama de Stanford. El mismo permite analizar un evento de integridad y distinguir a qué tipo pertenece, encontrando dos posibles opciones:

- Información errónea (MI): Se habla de información errónea cuando el sistema, declarado disponible, se halla en una situación en la que el error de posición supera el nivel de protección, pero no el nivel de alerta. La determinación del error no es fiable, pero se asegura que el error no supera el nivel de alerta impuesto.

- Información "peligrosamente" errónea (HMI): En este caso, este tipo de eventos ocurren cuando, estando el sistema disponible, el error de posición supera el límite de alerta. Tanto si la información es fiable como si no lo es (dependiendo de si el PL es inferior al AL o no), es seguro que la operación no es fiable.

La medición de la integridad se lleva a cabo mediante dos herramientas. La primera es el Índice de Seguridad (SI), que indica la relación entre el error de posición y el nivel de protección; la misma debe ser siempre menor a 1, indicando que no se han producido eventos de integridad. EGNOS presenta valores que rondan, con normalidad, el 0.5,

La segunda herramienta es el Diagrama de Stanford. La Figura 3.1 muestra un ejemplo de este invento, empleado para el análisis de la integridad:

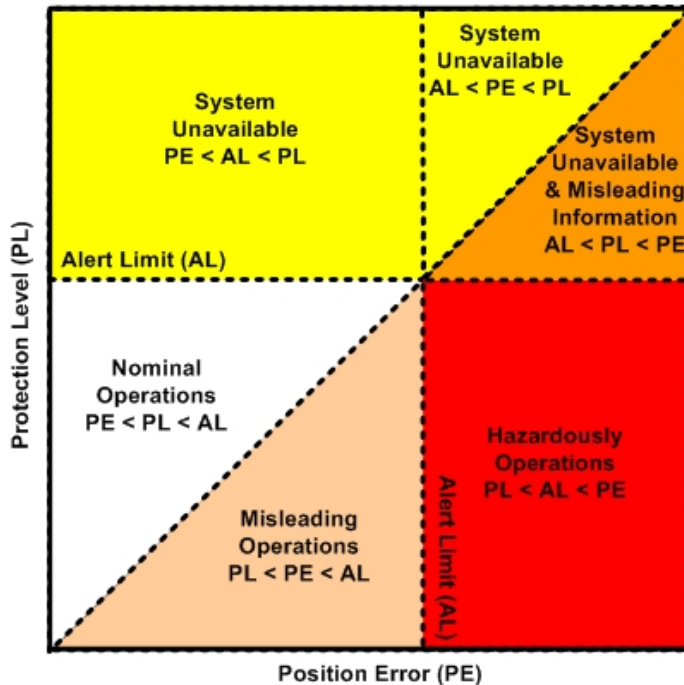


Figura 3.1: Diagrama de Stanford [16]

Este diagrama permite ilustrar, de manera sencilla, la mayoría de los conceptos introducidos. Para cada dato obtenido, se grafica su valor de error de posición

(eje de abscisas) y el nivel de protección asociado (eje de ordenadas). La línea diagonal separa aquellos puntos para los que el nivel de protección supera o cubre el error de posición (zona superior), de aquellos en los que el nivel de protección es superado por el error de posición (zona inferior). De esta forma, es posible realizar un rápido análisis de la integridad, observando que todos los puntos se mantengan en la zona superior de la diagonal (donde el sistema funcionará correctamente, o bien el valor de PL superará el valor de AL, activando la correspondiente alerta). De igual modo, puntos cercanos a la diagonal indican eventos de integridad cercanos a haber ocurrido, pero que no llegaron a suceder.

Analizando en detalle el diagrama, en el mismo se observan cinco zonas diferenciadas. Sobre la diagonal, se hallan las zonas en las que el sistema muestra un nivel de protección superior al error de posición. Si, además, ambos parámetros son menores que el límite de alerta:

$$PE < PL < AL$$

El sistema se encontrará en la zona de operación nominal, con lo que ninguna alerta por situación anómala deberá ser reportada; no obstante, si el nivel de protección es superior al límite de alerta:

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

El sistema se encontrará no disponible, al no ser capaz de proporcionar la fiabilidad requerida para la operación, y una alerta será entregada al sistema para no emplear dicha información. Bajo la diagonal mostrada, las posibles opciones son tres, y todas comparten el hecho de que la información mostrada será errónea (al encontrarse el nivel de protección por debajo del error de posición). En caso de que tanto el nivel de protección como el error de posición sean menores al límite de alerta:

$$PL < PE < AL$$

El sistema ofrecerá información errónea (MI), funcionando en estado de operación errónea (del inglés *misleading operations*). Si se da el caso en que ambos parámetros son superiores al límite de alerta:

$$AL < PL < PE$$

El sistema no se encontrará disponible, al superar el nivel de protección al nivel de alerta y, en adición, la información proporcionada no cumplirá con las especificaciones. Finalmente, si se da el caso en que el nivel de protección se encuentra bajo el límite de alerta, mientras que el error de posición lo supera:

$$PL < AL < PE$$

El sistema se encontrará operando de manera peligrosa (HMI), puesto que el error supera el límite de alerta y la información resulta fiable.

3.1.3 Disponibilidad

El concepto de disponibilidad de un sistema de navegación se corresponde con el porcentaje de tiempo en el que los servicios que proporciona el sistema pueden ser utilizados por el segmento usuario. Sirve como medida de la habilidad inherente del sistema de prestar servicio en la zona de cobertura asignada. El mismo concepto puede extrapolarse a la señal, siendo su disponibilidad el porcentaje de tiempo en que puede accederse por parte del receptor. El grado de disponibilidad depende tanto de las características del entorno de operación, como de la capacidad de transmisión del sistema.

Como se ha indicado, la medida de la disponibilidad se realiza mediante un porcentaje; sin embargo, este parámetro puede entenderse como la posibilidad de usar la señal proveniente de un único satélite, o bien la capacidad de determinar la posición del receptor en base a la constelación completa.

Para el caso de un único SV, la disponibilidad del mismo depende en su totalidad del correcto funcionamiento del vehículo, y que esté disponible únicamente asegura que la pseudodistancia del satélite será conocida: como se explicó en el capítulo anterior, hace falta disponer de un mínimo de tres satélites para poder obtener la ubicación de un móvil en el espacio, sin tener en cuenta errores de sincronización de los relojes. La determinación de esta posición, igualmente, se verá sujeta a restricciones adicionales, como que la misma se obtenga siendo el error esperado menor a un cierto umbral. Es por ello que, si este límite se sobrepasa, la señal del sistema está disponible pero no la información deseada, requiriendo que el sistema soporte integridad o que cuente con un sistema de referencia mediante el que comprobar los errores (de otra forma, la aplicación no será capaz de establecer si el umbral impuesto está siendo sobrepasado). Y, obviamente, la configuración de la constelación, la visibilidad del usuario y la disposición del entorno tendrán efecto en la recepción de la señal, influyendo finalmente en su disponibilidad.

3.1.4 Continuidad

Se define como continuidad de un sistema, la habilidad del mismo en su totalidad (incluyendo todos aquellos elementos necesarios para establecer y mantener la posición del móvil en el área definida) para ejecutar sus funciones de manera ininterrumpida durante toda la operación; dicho de otro modo, es la probabilidad de que la *performance* del sistema se mantenga durante toda la fase de operación, presuponiendo que el sistema se encontraba disponible previo al comienzo de la operación. A la hora de estimar la continuidad, se emplean frecuentemente dos tipos de medidas de tiempo: probabilidad de que se cumpla la continuidad en un período de una hora ($\%/h$), o en un período de 15 segundos ($\%/15s$).

Según el tipo de fallo que experimente el sistema, la continuidad se verá afectada de una u otra manera. A continuación, se exponen los grupos de fallos expuestos en el Estándar de *Performance* GPS SPS [17]:

- Fallos graves (*Hard Failures*): Como tales, se entienden aquellos fallos que derivan en el cese de la transmisión de la señal GNSS, pudiendo ser este cese gradual (p. ej., una caída gradual de la potencia de la señal, o un fallo continuado que impida la actualización del sistema y, consecuentemente, la degradación de la señal) o repentino. Más aún, estos fallos pueden agruparse en fallos a largo plazo (LT), y fallos a corto plazo (ST). Los primeros resultan en una pérdida irrecuperable de la señal, requiriendo el lanzamiento de un nuevo satélite, con el correspondiente proceso de puesta en órbita y el coste económico asociado; los segundos implican una pérdida temporal de la señal, requiriendo un cambio en la configuración del SV para utilizar subsistemas redundantes que sustituyan a aquellos que muestran comportamientos anómalos.

La pérdida de continuidad asociada a un fallo grave dependerá de si el CS es capaz de alertar del fallo al sistema con anterioridad al fallo de la señal. En caso de que la naturaleza del fallo permita al segmento de control emitir un aviso, no existirá pérdida de continuidad, al poder sustituir el vehículo espacial en cuestión por otro en condiciones de funcionamiento; si, al contrario, la pérdida de la señal se produce de manera inmediata, el segmento de control se ve incapaz de adelantarse al fallo, produciéndose el error. Esta pérdida de continuidad es evitable disponiendo de satélites adicionales, capaces de sustituir a los anteriores cuando se dan estas situaciones.

- Fallos leves (*Soft Failures*): El rasgo característico de los denominados fallos leves es que, a pesar de que uno ocurra, la señal continúa en estado de disponibilidad, sin emitir alerta o alarma alguna, por lo que en sí mismos no constituyen una pérdida de la continuidad, además de ser fallos no predecibles. Se habla entonces de un fallo de integridad.

No obstante, que estos fallos no supongan la pérdida de continuidad *per se*, no implica que no puedan derivar en la misma. Algunos fallos leves son detectables mediante sistemas a bordo del satélite por lo que, si el SV reacciona a esta detección transmitiendo una alerta de fallo, es ésta última la que propicia la pérdida al inutilizar la señal de navegación; igual sucede cuando es el segmento de control el que detecta y actúa contra estos fallos, anulando el uso de la señal por los posibles efectos del fallo encontrado. La consecuencia es un mensaje que indica al receptor que no debe emplearse el sistema.

- Fallos de desgaste (*Wear-Out Failures*): Como cualquier material y sistema, los satélites están sujetos a fallos de desgaste, que difieren de los fallos leves o graves en que son predecibles o, de otro modo, programables, al conocer el estado del satélite y su tiempo de vida. Estos fallos son característicos de un satélite en su fase Final de Vida (EOL), siendo poco o nada frecuentes en satélites recién puestos en órbita, o a mitad de su vida útil. Son, por tanto, fallos a largo plazo o LT, que el CS puede subsanar en parte permitiendo extender el período de uso del SV.

Para que se produzca la pérdida de continuidad debido a un fallo de este tipo, debe darse un error por parte del segmento de control: o bien, que el CS falle al predecir un fallo de desgaste (hecho poco probable debido al alto grado de conocimiento de estos sistemas), o bien, que el mismo falle a la hora de estimar el trabajo necesario para mantener un satélite en fase EOL tras un fallo de desgaste, pudiendo igualmente evitar la pérdida de continuidad emitiendo una alerta de situación previa al fallo del satélite.

- Operación y mantenimiento de satélites (*Satellite O&M Activities*): Por último, las actividades de mantenimiento realizadas por el segmento de control pueden ser fuente de un gran error de cálculo en los receptores de los usuarios (como las maniobras de posicionamiento de los satélites, o las actualizaciones de los relojes atómicos) y, aunque no constituyen fallos por sí mismos, desde el punto de vista de la integridad resultan en información errónea y deben ser catalogadas como tales.

Como característica única, este tipo de fallos se hallan planeados con anterioridad por el segmento de tierra, siendo éste capaz de alertar a los usuarios del estado de salud del satélite o satélites en mantenimiento para que no empleen dicha señal. Se salvaguarda así la integridad del sistema, poniendo en juego la continuidad del mismo si no se toman precauciones. Estas acciones preventivas pueden llevarse a cabo gracias al conocimiento con antelación de las labores de mantenimiento, permitiendo emitir las alertas correspondientes que eviten la pérdida de continuidad.

3.2 *Aircraft-Based Augmentation Systems (ABAS)*

En los Sistemas de Aumentación Basados en la Aeronave o ABAS, la aumentación o mejora de la señal de navegación se produce gracias a sensores y equipamiento ubicados en la propia aeronave. En este apartado entran los sistemas de navegación inercial y de navegación a estima, que no se ven afectados por las mismas fuentes de error que la señal GNSS al operar bajo principios diferentes, así como equipamiento específico. El sistema Receptor Autónomo de Monitorización de Integridad (RAIM) permite determinar la integridad de la señal GNSS e informar a la aeronave de la necesidad de cesar en el uso de esta señal, detectando satélites defectuosos; el sistema de Detección y Exclusión de Fallos (FDE) se encarga de cancelar la señal de tales satélites a la hora de calcular la posición. Los sistemas ABAS permiten el empleo de procedimientos GNSS en fases de ruta y aproximaciones de no precisión.

3.3 *Ground-Based Augmentation Systems (GBAS)*

El objetivo de los Sistemas de Aumentación Basados en Tierra (GBAS) es proporcionar mejoras en la integridad y precisión durante las fases de aproximación, aterrizaje y despegue, además de poder emplearse en operaciones de superficie. Para ello, se emplean receptores de señal GNSS en tierra que obtienen las pseudodistancias de los satélites disponibles y generan los datos de corrección e integridad, que son transmitidos en VHF a las aeronaves cercanas a la estación, con lo que su cobertura se ve limitada.

Más concretamente, los sistemas GBAS se centran en la mejora de la integridad y la precisión, aumentando las prestaciones de la constelación primaria. Mediante cuatro receptores de referencia, una estación GBAS y un transmisor en banda VHF, además de los correspondientes receptores a bordo de la aeronave, es capaz de reducir el error de posición por debajo del metro. La señal de la

constelación es usada por los receptores de referencia para calcular su posición y éstos, con ayuda de la instalación GBAS de tierra, calculan el error de la posición obtenida (ya que cuentan con una determinación de su posición de gran precisión). La instalación GBAS produce un mensaje de corrección y éste se envía por medio del transmisor VHF a las aeronaves colindantes. Mediante estas correcciones, es posible efectuar operaciones similares al uso de una instalación ILS, denominándose guiado *ILS-look-alike* en lengua anglosajona.

Como ejemplos de este sistema, se encuentran el GBAS de empleo estadounidense, conocido como Sistema de Aumentación de Área Local (LAAS), el sistema ruso LCCS-A-2000 o la instalación DGRS 610/615, desarrollada por Thales.

3.4 *Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)*

Los Sistemas de Aumentación Basados en Satélite, abreviados SBAS, permiten aumentar la señal procedente de sistemas GNSS a escala tanto regional como continental, mediante el uso de satélites en órbita GEO que transmiten la información referente a las correcciones. El objetivo principal es el de proporcionar integridad a la señal, y también mejora la precisión en el posicionamiento. Además de los satélites geoestacionarios, existe un conjunto de infraestructura terrestre que alberga estaciones sensoras encargadas de recoger la información de las constelaciones primarias, y enviarla a una estación central de procesado para crear la señal corregida o SIS. Los sistemas SBAS pueden ser empleados para operaciones de guiado de aeronaves y aproximaciones de precisión. El capítulo siguiente abordará con mayor detalle este conjunto de sistemas.

Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)

Los Sistemas de Aumentación Basados en Satélite, abreviados SBAS, pertenecen al conjunto de sistemas de aumentación, destinados a mejorar la *performance* de los sistemas GNSS primarios. Según la definición proporcionada por la OACI, un sistema GNSS es un "sistema de determinación de posición y tiempo de carácter global, que incluye una o más constelaciones de satélites, receptores embarcados, y sistemas de monitorización de integridad, aumentados de forma necesaria para cumplir con las especificaciones previstas para la operación"[18]. Los sistemas GPS y GLONASS no fueron diseñados pensando en los requerimientos de navegación a los que podrían verse sometidos, por lo que no son adecuados para su uso en aplicaciones de aeronavegación. Mediante una red de estaciones de referencia terrestres que monitorizan la señal de navegación, una estación maestra que recoge y procesa la información generando el mensaje SBAS, estaciones de enlace de subida encargadas de mandar dicho mensaje, y transpondedores a bordo de los satélites GEO a cargo de transmitir la información, es posible proveer a los usuarios con información sobre integridad y correcciones varias, además de proporcionar satélites adicionales para la resolución de la posición, habilitando pues el empleo de los sistemas GNSS en el ámbito aeronáutico.

Más concretamente, el sistema se sirve de tres elementos con los que aumentar la señal. Al contar con varios satélites geoestacionarios, éstos transmiten una señal de navegación en banda L1 (coincidente con la banda de frecuencia de la señal GPS), pudiendo emplearse esta señal por parte del usuario para el cálculo de la posición, aumentando así el número de satélites disponibles. Las correcciones diferenciales de área extensa (WAD) se calculan en el área de cobertura del sistema, y se utilizan para mejorar las prestaciones de las constelaciones, incorporando correcciones de las órbitas de los satélites, relojes y errores debidos a la propagación ionosférica. Se incluye, además, un Canal Terrestre de Integridad (GIC) para informar de la disponibilidad de los servicios de navegación de las constelaciones aumentadas [19].

De manera similar a los sistemas GNSS, la arquitectura de los sistemas SBAS se divide en segmentos: Segmento Espacial, Segmento de Misión Terrestre (equivalente al Segmento de Control) y Segmento Usuario. Adicionalmente, cuenta con un cuarto segmento, conocido como Segmento de Soporte de Misión.

- Segmento espacial: El mismo lo componen varios satélites GEO encargados de transmitir el mensaje de navegación SBAS en el área de cobertura. Típicamente, los satélites SBAS son satélites multipropósito con una carga de pago adicional, encargada de generar el mensaje de navegación y enviar la señal tipo GPS (*GPS-like*). En concreto, esta carga de pago es un transpondedor que recibe la señal proveniente del enlace de subida (banda C), y la reenvía de vuelta a Tierra (banda L). Con el paso del tiempo, se han introducido mejoras en los satélites, permitiendo el uso de dos bandas de frecuencia con las que mitigar los efectos atmosféricos, el aumento del ancho de banda, y el empleo de transpondedores regenerativos que construyen la señal a bordo del SV, recibiendo de tierra únicamente el mensaje SBAS.
- Segmento de misión terrestre: El objetivo principal de este segmento es el de generar y enviar hacia el segmento espacial la señal de aumentación, que será retransmitida posteriormente por los satélites GEO. Dentro de este segmento, se identifican diversos subsistemas a cargo de las funciones asociadas a este segmento.

La Red de Estaciones Monitoras consiste en un conjunto de receptores GNSS, dedicados a monitorizar los satélites y la ionosfera con la precisión y disponibilidad correspondientes en el área de cobertura. Se trata de una red extensa, de gran densidad y redundante, para evitar fallos puntuales. Estas estaciones de recepción cuentan con receptores de doble banda, relojes atómicos en cumplimiento con el estándar (cesio, rubidio o

hidrógeno), se encuentran emplazadas en localizaciones aptas en términos de radiointerferencia y efecto multicamino, y están georreferenciadas con precisión centimétrica.

La Instalación Central de Procesado es un elemento de importancia crítica en los sistemas SBAS, al encargarse de generar la información de aumentación para el usuario. La misma recolecta la información obtenida por las estaciones monitoras, calcula las correcciones, realiza un estudio exhaustivo de la integridad, y produce resultados correctivos conforme a los estándares SBAS. Se sirve de modelos predictivos para órbitas satelitales, estimaciones en tiempo real de la ionosfera y determinación temporal con precisión de nanosegundos.

El Centro de Control de Satélites GEO codifica la señal de características similares a la señal GPS, incluyendo el código PRN, y modula el mensaje SBAS en la misma. También sincroniza la referencia temporal en base al tiempo de referencia SBAS, envía la señal al segmento espacial, y controla la señal de bajada emitida por los satélites.

Existe, finalmente, una Capa de Comunicación, que asegura la interconexión de todos los elementos del segmento terrestre en tiempo real, confirmando la integridad, redundancia y ancho de banda necesarios para ejecutar la conexión siguiendo los estándares.

- Segmento usuario: Engloba todo el equipamiento que hace uso de la señal SBAS. Los servicios comúnmente ofrecidos al segmento usuario son el Servicio Abierto, en Servicio Comercial y el servicio destinado a la navegación aérea (*Safety of Life*), que serán definidos con posterioridad.
- Segmento de soporte de misión: Este segmento contiene aquellos elementos que no están relacionados con la provisión del servicio SBAS, pero son requeridos como elementos externos de soporte, que ayudan en las fases de diseño y validación, lanzamiento, certificación o mantenimiento. Ejemplos de estos elementos son los Simuladores de Extremo a Extremo (*End to End*), que simulan el sistema al completo (algoritmos, retrasos y errores incluidos), y las herramientas de análisis de las prestaciones, cuyo misión es monitorizar los parámetros de precisión, disponibilidad, continuidad e integridad.

Mediante el sistema SBAS, se consigue una mayor disponibilidad de servicio para las constelaciones primarias y, para ciertas configuraciones, es posible realizar Procedimientos de Aproximación con Guiado Vertical (APV). Igualmente, un procedimiento SBAS puede, en muchos casos, tener mínimos de operación

menores en comparación con su homólogo de no precisión. En el caso de las operaciones APV (con altura de decisión, DH, de 75 metros), los mínimos resultan mayores que para una aproximación de Categoría I, pero requiriendo diferente infraestructura (inexistente en el caso de una aproximación SBAS), incrementando finalmente la seguridad y la usabilidad en los aeropuertos. Adicionalmente, los sistemas SBAS soportan todas las operaciones RNAV y en ruta existentes, permitiendo maximizar la eficiencia y capacidad del espacio aéreo, y dar de baja los antiguos sistemas de radioayuda, suponiendo un ahorro en gasto de infraestructura [20].

En el presente capítulo, el concepto relativo a estos sistemas será estudiado, presentando el fundamento matemático sobre el que se construyen, introduciendo el SBAS europeo, conocido como EGNOS, y se pasará a explicar la estructura del mismo, los servicios que provee y su desarrollo futuro. Para terminar, se introducirán otros sistemas SBAS existentes.

4.1 Fundamento matemático

Como se introdujo en apartados anteriores, los sistemas GNSS actuales hallan la posición del receptor mediante triangulación esférica, empleando los pseudor rangos obtenidos de cada satélite gracias a la señal de navegación. Es momento de introducir las ecuaciones que rigen la solución de la posición, para poder estudiar el proceso mediante el que se obtienen las correcciones SBAS [21].

La distancia geométrica entre un punto de observación i y un satélite j es:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - x_i)^2 + (Y^j(t) - y_i)^2 + (Z^j(t) - z_i)^2} \quad (4.1)$$

Donde $X^j(t)$, $Y^j(t)$ y $Z^j(t)$ son las coordenadas del vector posición del satélite j en la época t , y los valores x_i , y_i y z_i son las coordenadas incógnita del punto. La pseudodistancia desde un receptor i hasta un satélite j , en la época t , se expresa como:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c\Delta\delta_i^j(t) \quad (4.2)$$

El parámetro $R_i^j(t)$ corresponde a la pseudodistancia medida entre ambos elementos (receptor i y satélite j). $\Delta\delta_i^j(t)$ incluye las desviaciones de los relojes

del satélite y del receptor con respecto al tiempo GPS. La ecuación 4.2 puede escribirse de la siguiente forma, al expandir el término del error de los relojes:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_i(t) \quad (4.3)$$

Particularizando la ecuación 4.3 para una estación base A cuya posición es medida en el instante t_o , e introduciendo el término $\Delta\rho_A^j(t_o)$, referente al error radial de la órbita del satélite junto con la refracción ionosférica y troposférica, se obtiene la ecuación 4.4

$$R_A^j(t_o) = \rho_A^j(t_o) + \Delta\rho_A^j(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_A(t_o) \quad (4.4)$$

La estación base es de posición conocida, con lo que el término $\rho_A^j(t_o)$ no añade incógnitas al problema. En la época t_o , la corrección de la pseudodistancia (PRC) corresponderá con la diferencia entre la distancia real y la pseudodistancia medida:

$$PRC^j(t_o) = \rho_A^j(t_o) - R_A^j(t_o) = -\Delta\rho_A^j(t_o) + c\delta^j(t_o) - c\delta_A(t_o) \quad (4.5)$$

Mediante el uso de un conjunto o serie temporal de correcciones de pseudodistancias, es posible hallar la variación de las mismas mediante una derivación numérica (RRC), estableciendo la función que permite calcular la corrección de pseudodistancias para una época cualquiera:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_o) + RRC^j(t_o)(t - t_o) \quad (4.6)$$

En esta ecuación, el intervalo temporal escogido resulta fundamental para obtener la máxima precisión. Introduciendo ahora un receptor B cuya pseudodistancia al mismo satélite es, para un instante t :

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_B(t) \quad (4.7)$$

Es posible aplicar al mismo la corrección de la pseudodistancia obtenida en 4.6, obteniendo la pseudodistancia corregida de la estación B :

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) \quad (4.8)$$

Desarrollando el término de corrección:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + c(\delta_B(t) - \delta_A(t)) \quad (4.9)$$

Como puede observarse, el término $PRC^j(t)$ puede sustituirse por el valor descrito en 4.5 y 4.6, eliminando así el error debido al reloj del satélite. Si, en adición, se supone que el error de órbita para las distancias a las estaciones A y B desde el satélite j es el mismo, ambos se anulan, quedando la expresión:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (4.10)$$

Siendo el último término de la ecuación el error combinado de los relojes de los receptores:

$$\Delta\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t) \quad (4.11)$$

De esta forma, se consigue eliminar, de manera matemática, el error debido al reloj ubicado en el satélite, los errores ionosféricos y troposféricos, y los posibles errores de posición en los SVs.

4.2 EGNOS

El Servicio Geoestacionario Europeo para Cobertura de la Navegación, mayormente conocido por sus siglas como EGNOS, es el sistema de aumentación por satélite de gestión europea, que complementa los servicios aportados por el sistema GPS en materia de navegación. Desarrollado de manera conjunta por la Agencia Espacial Europea (ESA), la Unión Europea y EUROCONTROL, constituye una de las dos iniciativas de relevancia en el ámbito europeo en materia de navegación por satélite, junto con el programa Galileo.

En vista del control militar ejercido por los sistemas GPS y GLONASS y la exigencia de requerimientos cada vez más exhaustivos en el ámbito de la navegación aérea, surge la necesidad de un sistema de operación europea que permita mejorar las prestaciones de las constelaciones primarias. El objetivo de EGNOS es el de implementar un sistema que cumpla con los requisitos de usuario en diversas aplicaciones (tanto aéreas como marítimas y terrestres) mediante una capa (*overlay*) de aumentación, aplicada a las constelaciones anteriores. Siguiendo las bases de los sistemas SBAS, se emplean satélites GEO

para la transmisión de señales similares a las emitidas por el GPS, en las que se incluye información sobre la integridad y las correcciones diferenciales [22].

4.2.1 Arquitectura del sistema

La arquitectura que presenta el sistema es la misma que la presentada anteriormente como modelo de los sistemas SBAS, y será explicada a continuación [23].

El segmento espacial de EGNOS se compone en la actualidad de un satélite Inmarsat-3-F2 (lanzado en 2011), un satélite Astra 5B (en servicio desde 2014 y operacional desde 2017), y un satélite SES-5 en fase de pruebas (desde 2017) [24], posicionados de manera óptima en términos de disponibilidad y visibilidad, mejorando la geometría del conjunto, maximizando el ángulo de visión, reduciendo la probabilidad de bloqueo o interferencia de la señal y asegurando una cobertura mínima de dos satélites en todo el territorio abarcado. La emisión de la señal se realiza en la banda de frecuencia L1, coincidente con la de la señal GPS y en consonancia con el resto de sistemas SBAS. El diseño de la constelación asegura la redundancia en términos de señal, así como la posibilidad de sustitución de vehículos espaciales o transpondedores sin que ello afecte a la operación del sistema o a los usuarios.

El segmento de control o tierra del sistema EGNOS resulta de gran complejidad. El mismo está compuesto por una red de Estaciones Monitoras de la Integridad (RIMS), cuatro Centros de Control de Misión (MCC), seis Estaciones de Navegación Terrestres (NLES), y la Red de Área Extensa EGNOS (EWAN), que provee con un medio de comunicación a todo el segmento, erigiéndose como medio de intercambio de información entre cada elemento. A modo de soporte, se incluye la Instalación de Comprobación y Determinación de la *Performance* (PACF) y la Instalación de Cualificación Específica (ASQF):

- Las estaciones RIMS recolectan la señal de navegación de las constelaciones primarias, y transmiten dichos datos a las Instalaciones Centrales de Procesado (CPF) de cada MCC. Actualmente existen más de 40 estaciones repartidas por la geografía europea, además de ciertas unidades emplazadas en Canadá, la Guayana francesa o Sudáfrica. Existen tres tipos de estaciones RIMS, y todas ellas están georreferenciadas con gran exactitud.

Las de tipo A suministran mediciones en crudo de los satélites visibles, y estos datos se emplean para calcular las correcciones y obtener los umbrales de confianza. Las RIMS de tipo B proporcionan igualmente medi-

ciones crudas de las constelaciones, pero se destinan a la comprobación de los mensajes de difusión y a garantizar la integridad del sistema. Las RIMS de tipo C, por último, se dedican a la detección de fallos específicos debidos a anomalías en los satélites, y sus consecuencias en la onda electromagnética de emisión del mensaje EGNOS.

- Los centros de control de misión o MCC supervisan y controlan todo el segmento terrestre del sistema y el funcionamiento de la misión mediante la Instalación Central de Control (CCF), además de procesar los datos obtenidos de las estaciones RIMS, determinar las correcciones de los relojes y las órbitas de los satélites, establecer los modelos de corrección para el error ionosférico, y garantizar la integridad, todo ello mediante las CPF. Existen cuatro MCC, localizados en Ciampino (Italia), Langhen (Alemania), Swanwick (Reino Unido) y Torrejón (España).
- Las estaciones NLES se destinan a la generación de la señal EGNOS, y su correspondiente transmisión a los satélites. Se encargan de sincronizar el tiempo con la hora EGNOS (al no contar los satélites con relojes atómicos), y supervisan la integridad del proceso para aseverar la corrección de la información enviada. Existen dos estaciones de este tipo por cada satélite, estando una activa y encontrándose la otra en estado de reserva.
- Las instalaciones de soporte (PACF y ASQF) coordinan y supervisan el mantenimiento y la operación del sistema, y proporcionan soporte a las aplicaciones de usuario respectivamente. Del mismo modo, una se encuentra en Toulouse, y la otra estación se halla en Torrejón.

En último lugar, el segmento de usuario lo componen los receptores compatibles con la señal EGNOS, siendo la estructura de los mismos muy similar a la de un receptor GPS común. La recepción de la señal puede complementarse mediante el servicio SISNeT de transmisión de correcciones mediante internet, característica que se explicará en breves.

4.2.2 Correcciones generadas

EGNOS permite la mejora de las prestaciones asociadas a los sistemas de navegación mediante la generación de correcciones, que serán empleadas por los usuarios equipados con receptores aptos. Se pueden determinar tres tipos de correcciones, dependiendo de su finalidad [25]. Como se expone en el siguiente punto, existen 20 tipos diferentes de mensaje que el sistema puede emitir (de 64 posibles) y, en base al tipo de mensaje, la información obtenida varia-

rá. La información referente a las correcciones debe buscarse en los mensajes destinados a tal efecto.

Las correcciones rápidas se producen con el objetivo de mitigar los errores producidos por la sincronización de los relojes. Reciben este nombre debido a su naturaleza, rápidamente cambiante. Los mensajes encargados de transmitirlos incluyen, en adición, la precisión de dichas correcciones. Esta información puede hallarse en los mensajes de tipo 1 (información sobre los satélites sobre los que se van a enviar correcciones), y del tipo 2 al tipo 5 (mensajes específicos sobre estas correcciones).

Las correcciones a largo plazo informan al usuario de las modificaciones a implementar en la posición de los satélites e incluyen, como antes, la precisión con la que estas correcciones se han obtenido; de igual forma, su nombre se debe a su menor ratio de cambio. Para obtener estos datos, deben decodificarse los mensajes de tipo 1 (nuevamente, para conocer los satélites objetivo), tipo 24 (caso especial, incluye correcciones rápidas y a largo plazo) y tipo 25 (mensaje específico sobre la corrección determinada).

Como último tipo de corrección, se encuentran las correcciones ionosféricas: EGNOS es capaz de modelizar la ionosfera en tiempo real, generando un perfil matemático que será enviado a los usuarios para que determinen qué corrección aplicar para este efecto. La información destinada a las correcciones ionosféricas se halla en los mensajes tipo 18 (modelo de red de puntos de la ionosfera) y tipo 26 (correcciones del retardo ionosférico).

4.2.3 Estructura del mensaje

La estructura del mensaje EGNOS se encuentra definida en el documento DO-229 publicado por la Comisión Radiotécnica para la Aeronáutica (RTCA) [26], y resulta de gran interés estudiarla para comprender el modo en que los receptores EGNOS interpretan y decodifican la señal para implementar las correcciones.

El mensaje de navegación sin tratar consta de 500 bits, de los cuales la mitad contienen la información relevante para el usuario, utilizándose la otra mitad para codificar la señal mediante un proceso de convolución. El mensaje restante, de 250 bits, consta de cuatro partes:

- Preámbulo: Es un campo de 8 bits, empleado para conseguir sincronía entre la señal SBAS y la señal GPS, haciendo coincidir ambas señales.

- Identificador del tipo de mensaje: Es un conjunto de 6 bits, que identifica el tipo de mensaje que se transmite. De 64 posibles tipos de mensajes, actualmente se encuentran definidos únicamente 20 de los mismos.
- Campo de datos: Como indica su nombre, este apartado de 212 bits almacena toda la información referente a las correcciones y a la integridad, y varía con el tipo de mensaje.
- Información de paridad: Los últimos 24 bits del mensaje son bits de paridad, que permiten proteger la información de posibles errores aleatorios o de pérdida de datos. Su uso es recurrente en la mayoría de medios de transmisión de información digitales.

La Tabla siguiente (4.1) muestra los tipos de mensajes existentes, junto con la información que incorporan:

Tipo	Contenido
0	No emplear en aplicaciones críticas
1	Asignación de máscaras PRN
2-5	Correcciones rápidas
6	Información sobre integridad
7	Factor de degradación de correcciones rápidas
9	Mensaje de navegación
10	Parámetros de degradación
12	Tiempo SBAS / Parámetros de compensación UTC
17	Almanaque de la constelación GEO
18	Máscaras de la red de puntos de la ionosfera
24	Correcciones rápidas mixtas / Correcciones a largo plazo
25	Correcciones a largo plazo
26	Correcciones del retardo ionosférico
27	Mensaje de servicio SBAS
28	Matriz de covarianza de las efemérides y del reloj
62	Mensaje interno de comprobación
63	Mensaje nulo

Tabla 4.1: Tipos de mensaje SBAS

De los tipos expuestos, conviene comentar aquellos que serán de mayor utilidad durante la realización del proyecto.

La recepción de un mensaje **tipo 0** es propia durante la fase de pruebas del sistema. En el momento en que se recibe, toda la información obtenida relativa a correcciones y determinación de la posición mediante pseudodistancias debe ser descartada en el caso de ser usadas en aplicaciones críticas, indicando que la integridad del sistema se ha visto comprometida.

Los mensajes del **tipo 2 a 5** incluyen las correcciones rápidas y los valores de desviación del error. Si es de tipo 2, el mensaje incluye correcciones para los 13 primeros satélites incluidos en la máscara, si es de tipo 3 incluirá datos para los satélites ubicados en las posiciones 14 a 26, y así, sucesivamente. El tiempo en el que estas correcciones pueden aplicarse se define e indica en el primer bit del preámbulo del mensaje SBAS.

Un mensaje de **tipo 6** transmite la información en relación a la integridad para 51 satélites, el máximo presente en una máscara PRN. Puede emplearse tanto para actualizar las correcciones rápidas, como en caso de alerta emitida por un SV.

El mensaje de **tipo 9** incluye el mensaje de navegación, que puede utilizarse para obtener un número mayor de satélites y, por tanto, de pseudodistancias, con las que obtener y resolver la posición del usuario.

La recepción de un mensaje de **tipo 25** implica la obtención de las correcciones a largo plazo, proporcionando estimaciones del error de las efemérides y los relojes.

Finalmente, el mensaje de **tipo 26** provee al usuario con las correcciones necesarias para corregir el retardo ionosférico. Mediante un modelo de la ionosfera, dependiente de la localización geográfica del usuario, es posible determinar los valores a utilizar para solventar este error.

4.2.4 Servicios

EGNOS ha sido concebido como un sistema SBAS interregional multimodo, soportando un amplio espectro de aplicaciones en gran variedad de comunidades, capaz de dotar a las constelaciones primarias de la época de las capacidades necesarias para cumplir con los estrictos requisitos de segmentos tales como el marítimo o aéreo. Los servicios que ofrece se detallan a continuación:

- En primer lugar, se halla el Servicio Abierto (OS) de EGNOS, que consiste en un conjunto de señales SBAS pensadas para la mejora en el posicionamiento y las prestaciones de los sistemas GNSS para aplicaciones de

propósito general. Es un servicio libre, no requiriendo de un pago para hacer uso del mismo, y no necesita autorización previa por parte de ninguna autoridad. Se encuentra plenamente operativo desde 2009, necesitando un receptor apto habilitado para la recepción de señal EGNOS, y convirtiéndose así en el primer servicio en estar disponible para su uso. El servicio abierto debería ser utilizado únicamente en aplicaciones no críticas, al no existir garantía de servicio o responsabilidad por parte del proveedor de servicio, la Comisión Europea o la ESA [27].

La precisión obtenida, por ejemplo, no permite, asimismo, su uso en este tipo de aplicaciones, como podrá verse en capítulos posteriores. EL sistema puede garantizar, con una probabilidad del 95 %, una precisión de 3 metros en el plano horizontal, y de 4 metros en el eje vertical, asumiendo el peor caso de ubicación del receptor. Igualmente, existen diversas causas que pueden propiciar una degradación del servicio: retrasos en la transmisión, atenuación de la señal (debido a entornos cerrados o inclemencias atmosféricas), bloqueo de la señal en zonas urbanas o de gran latitud, y efectos multicamino o de interferencia, son algunos de los motivos que pueden desembocar en la pérdida de precisión, prestaciones o incluso del servicio.

- El Servicio Comercial EGNOS de Distribución de Datos (CDDS) permite la distribución de datos adicionales a usuarios profesionales por medios diferentes a la transmisión desde satélites geoestacionarios. El acceso a este servicio se encuentra controlado, y está destinado a clientes que necesitan prestaciones mayores o destinan su uso a aplicaciones comerciales. Gracias a este servicio, se puede obtener la señal EGNOS en entornos urbanos o aquellos donde la recepción de la señal se vea dificultada.

El núcleo de este servicio lo compone el Servicio EGNOS de Acceso de Datos (EDAS), mediante la transmisión de información EGNOS vía Internet. EDAS permite a cualquier entidad autorizada a acceder a la información SBAS generada y recogida por EGNOS, de manera gratuita. Entre sus ventajas, se encuentran la alta tasa de transferencia de datos, la fiabilidad del servicio, y el acceso a datos GLONASS y a los datos no procesados procedentes de las estaciones RIMS y NLES. La transmisión particular del mensaje EGNOS se lleva a cabo mediante un protocolo específico, conocido como SISNeT [28].

Además de estos dos servicios, conviene destacar un tercer elemento, conocido como servicio *Safety of Life*, destinado al uso de EGNOS para aplicaciones críticas relacionadas con el transporte.

El Servicio *Safety of Life* consiste en el uso de la señal de aumentación EGNOS en conjunto con el servicio de posicionamiento estándar o SPS de la señal GPS para permitir el empleo de sistemas GNSS en aplicaciones críticas, relacionadas con los segmentos de transporte marítimo, aéreo o terrestre, en los que la degradación de las prestaciones del sistema de navegación y la falta de conocimiento por parte del usuario en un tiempo concreto, podría desembocar en situaciones de peligro para la vida [29].

El uso del servicio Sol conlleva la adquisición de un receptor certificado, y su uso en el área de cobertura del servicio. Asimismo, las operaciones de navegación basadas en este servicio deben ser autorizadas por las autoridades competentes, salvo que las mismas determinen que esta autorización no es necesaria. Una aeronave u operador deberá ser suscriptor del Acuerdo de Nivel de Servicio establecido para poder obtener garantías de servicio por parte del proveedor de servicios.

Cubriendo la práctica totalidad del segmento de transporte, el objetivo principal del servicio es el de servir de soporte a las operaciones de aviación civil, permitiendo operaciones con guiado vertical siguiendo los estándares de la OACI. En 2011, se declaró la señal SoL disponible oficialmente para la aviación civil, y actualmente puede utilizarse en todas las fases del vuelo.

Son numerosas las ventajas que aporta este servicio al mundo de la aviación: aumento de la seguridad en todas las fases de vuelo, reducción de los costes operativos, menor emisión de contaminantes, mayor eficiencia de operación y capacidad, y menor contaminación acústica.

4.2.5 Interoperabilidad y evolución futura

Existen varios sistemas de aumentación mediante satélite desarrollados o en proceso alrededor del mundo, como se verá al final del capítulo. Aunque los sistemas SBAS se entienden como sistemas regionales, es necesaria la coordinación y cooperación entre los diferentes operadores y sistemas, en pos de una aplicación más efectiva de los mismos como parte de un sistema de navegación a escala global. Este objetivo pasa por el empleo de estándares comunes y requisitos de interoperabilidad que todos los sistemas deben cumplir. En la actualidad, existen grupos de trabajo conjunto, encargados de concebir y desarrollar interfaces y métodos con el objetivo de obtener un red de sistemas conjunta, como el Grupo de Trabajo para la Interoperabilidad (IWG).

El Programa de Evolución Europeo GNSS, definido en 2006 por la ESA, se encuentra a cargo del desarrollo y mejora de los sistemas EGNOS y Gsalileo.

Actualmente, se trabaja en el concepto de interoperabilidad de EGNOS con el resto de sistemas, con el objetivo de desarrollar la tercera versión del sistema de aumentación (EGNOS V3), que permitiría solventar problemas de obsolescencia, proporcionar nuevos servicios, aumentar la cobertura de la constelación, y trabajar en conjunto con Galileo en un método de aumentación dual que permitiría operaciones con mínimos menores en comparación con las actuales (menor Límite de Alerta Vertical que en operaciones LPV-200).

4.3 Otros sistemas SBAS

4.3.1 WAAS

El Sistema de Aumentación de Área Extensa (WAAS) es el sistema de aumentación por satélite estadounidense. El programa comenzó en 1992, y fue desarrollado de manera conjunta por Administración Federal de Aviación (FAA) y el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT). Desarrollado especialmente para la aviación, en 2003 activó su servicio *Safety of Life*, permitiendo operaciones en ruta, terminales y aproximaciones LPV-200 (equivalentes a CAT I mediante ILS) en un área de cobertura que abarca el 95 % del territorio estadounidense, porciones de Alaska, y parte de México y Canadá; en total, el número de aeropuertos que hace uso de esta tecnología supera el millar. Actualmente, se encuentra en constante evolución, habiendo completado dos fases de desarrollo y encontrándose en finalización de una tercera, con vistas a una actualización futura que permita el uso de dos frecuencias [30].

El sistema WAAS, de referencia mundial para el resto de constelaciones SBAS, cuenta con múltiples satélites en órbita GEO, estaciones de referencia, subida y maestras encargadas de la generación del mensaje WAAS, y un extensa red de receptores WAAS equipados en numerosas aeronaves, certificados mediante diversos estándares, como RTCA.

Los objetivos del sistema pasan por proporcionar las prestaciones relativas a la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad al sistema GPS, habilitándolo para su uso en navegación aérea, para cualquier fase del vuelo. Concretamente, los procedimientos de vuelo que habilita hoy en día son:

- Navegación Lateral y Navegación Vertical (LNAV y VNAV).
- *Localizer Performance* (LP).
- *Localizer Performance with Vertical Guidance* (LPV).

- *Localizer Performance with Vertical Guidance down to CAT I precision (LPV-200).*

4.3.2 MSAS

El Sistema Satélite Multifuncional de Aumentación (MSAS) es el sistema de aumentación por satélite japonés. Utiliza los satélites propiedad del Ministerio Japonés de Tierra, Infraestructura y Transporte, y la Agencia Meteorológica Japonesa, conocidos como MTSAT. El sistema fue aprobado para su uso en aviación durante el año 2007, proporcionando servicio en ruta, terminal y para aproximaciones de no precisión [30].

Mediante dos satélites GEO multipropósito, se transmiten las señales SBAS a los receptores, que emplean las correcciones MSAS producidas por el segmento de control para mejorar su posicionamiento. Éste último cuenta con cuatro estaciones monitoras y dos estaciones maestras, además de dos estaciones auxiliares encargadas de corregir las órbitas de los satélites MTSAT.

4.3.3 GAGAN

El sistema GAGAN, o sistema de Navegación por GPS Aumentado mediante satélites GEO, es el sistema SBAS controlado por el gobierno de la India. Autorizado en 2001, el proyecto se dividió en tres etapas. La fase de demostración finalizó en 2007, dando paso a la fase inicial de experimentación. Tras el fallo de puesta en órbita de 2010, el primer satélite GAGAN alcanzó la órbita GEO en 2011, seguido por un segundo satélite un año más tarde, y un tercer satélite completando la constelación en 2014 [30].

Su estructura la componen los segmentos comunes al resto de sistemas: el segmento espacial cuenta con tres satélites geoestacionarios, el segmento de control maneja la operación de los satélites y el mensaje SBAS, y se espera un alto grado de interoperabilidad de los receptores GAGAN con el resto de sistemas de navegación.

Un problema particular que afronta el sistema es el cinturón de anomalía ionosférica presente en estas latitudes, sobre la zona de cobertura en la que opera GAGAN. El mismo afecta tanto a la señal como a los receptores, requiriendo prestaciones de precisión e integridad más exigentes para proporcionar la seguridad necesaria en la operación.

Capítulo 5

Performance Based Navigation (PBN)

El presente proyecto emplea, del modo explicado anteriormente, los sistemas GNSS y SBAS (EGNOS) para obtener la información necesaria con la que proceder a un análisis de la señal, y la correspondiente determinación de las prestaciones del sistema de navegación. El objetivo final consiste en la certificación de un procedimiento de navegación basado en sistemas SBAS. Para realizar este proceso de validación, es necesario introducir el estado actual de la navegación aérea, pudiendo entender así la forma en la que se idean los procedimientos de vuelo actuales y sus respectivos requerimientos, así como la definición y las características del tipo de aproximación que pretende certificarse en un futuro, conocida como LPV, y la relación de este tipo de navegación con los sistemas de navegación globales mediante satélite.

El crecimiento continuo del tráfico aéreo, la necesidad de proporcionar mayor eficiencia en la operaciones, a la par que dotar al sistema de mayor capacidad, requiere que el espacio aéreo existente sea optimizado. Para ello, se está procediendo a escala global mediante la aplicación de procedimientos de Gestión del Tráfico Aéreo mejorados, y la explotación de los avances tecnológicos en los campos de la Comunicación, la Navegación y la Vigilancia (CNS). En concreto, el empleo de técnicas de navegación de área (RNAV) en todas las fases del

vuelo contribuye de manera directa en la mejora sustancial de la optimización del espacio aéreo, pudiendo hacer uso de estas técnicas mediante sistemas de a bordo, denominados sistemas RNAV, caracterizados por unas ciertas prestaciones, de las que dependerá su posible uso en ciertas operaciones.

En este punto, es necesario que tanto la tripulación de las aeronaves como los encargados del control del tráfico aéreo comprendan y sean conscientes de estas prestaciones características de los sistemas, y aseguren que las mismas cumplen con los requisitos del espacio aéreo. Estos sistemas son el núcleo de la navegación PBN, introduciendo así requerimientos de aprobación para el uso de estos sistemas.

El capítulo actual se dedica, pues, al conocimiento de la Navegación Basada en Prestaciones (PBN), referente actual en este mundo para el diseño de procedimientos, donde el papel de los sistemas GNSS resulta fundamental. Dentro de este tipo de navegación, se expondrán algunos procedimientos comunes, momento en que se presentará la aproximación LPV-200. Para culminar, se expondrán las iniciativas a nivel europeo y americano de gestión, renovación, revisión y unificación del espacio aéreo.

5.1 Problemática de la navegación convencional

En la actualidad, el cambio hacia la navegación basada en prestaciones se produce desde la conocida como navegación convencional: la misma se basa en el empleo de radioayudas y balizas (como los sistemas VOR, NDB o ILS), y permite únicamente el establecimiento de rutas entre puntos conocidos como fijos. Los fijos (del inglés *fix*) son puntos cuya localización se encuentra definida por una radioayuda o una combinación de las mismas, ya sea por su distancia o rumbo con respecto a uno de estos sistemas; si las radiobalizas no se encuentran operativas, debe navegarse a estima, procedimiento que obtiene la posición actual del móvil mediante el tiempo transcurrido en el que el objeto se ha desplazado a una cierta velocidad y con un rumbo predefinido.

La precisión de la navegación convencional se encuentra ligada a la radioayuda utilizada, y la tolerancia de esta medida aumenta conforme la distancia a la baliza es mayor. Asimismo, es necesario un sensor y sistema en cabina para cada radioayuda diferente, haciéndose necesario un procedimiento de vuelo que sea independiente de los sensores de uso.

Este tipo de navegación no es capaz de lidiar con las mejoras a implementar en la gestión del tráfico aéreo. La situación actual exige la evolución de las rutas

disponibles, haciéndolas más flexibles, directas y eficientes. Por ello, no deben verse restringidas por la infraestructura disponible en cada región o momento, sino que deben variar con el tiempo y los requerimientos de cada vuelo, presentando mejoras sustanciales en el impacto medioambiental, los tiempos de vuelo y el uso del espacio aéreo. Es en este último punto donde la necesidad se vuelve aún más importante: en la actualidad, parte del espacio aéreo europeo se encuentra altamente congestionado, y la solución a este problema pasa por la creación de rutas alternativas, la reducción de la separación lateral entre las trayectorias de las aeronaves, y la reducción de la carga de trabajo impuesta a controladores y pilotos.

Hoy en día, el sistema en su conjunto impone la modificación de los procedimientos tradicionales, cuya precisión y funcionamiento depende de la infraestructura disponible, estableciendo un nuevo tipo de navegación, adaptada a la tecnología actual, y cuya aplicación suponga la solución de los problemas existentes, la introducción de mejoras sustanciales en el marco de la navegación, y la progresiva pérdida de la navegación convencional, presente como alternativa en caso de fallo, pero utilizada cada vez con menor frecuencia [31].

Tras la descripción del concepto de navegación PBN y sus especificaciones, podrá entenderse como los sistemas GNSS y los sistemas de aumentación tienen una gran importancia en la implementación de este tipo de navegación, permitiendo cumplir las especificaciones de precisión o integridad, eliminando la dependencia en la infraestructura de radiobalizas presente hasta la fecha.

5.2 Concepto PBN

El concepto de Navegación Basada en Prestaciones, abreviado PBN e ideado por la OACI, identifica tres componentes básicos:

- La Aplicación de Navegación (*Navigation Application*) engloba conceptos como las rutas aéreas, los instrumentos de navegación o los procedimientos de navegación. Es el objetivo a conseguir mediante los otros dos componentes: La Especificación de Navegación y la Infraestructura de Radioayudas.
- La Infraestructura de Radioayudas (*NAVAID Infrastructure*) hace referencia a todos los elementos de ayuda a la navegación, basados tanto en tierra como en el espacio, a excepción del sistema NDB, excluido en la definición de PBN.

- La Especificación de Navegación (*Navigation Specification*) es el elemento más novedoso que incorpora este tipo de navegación. El término se identifica como la especificación técnica y operacional que establece las prestaciones y funcionalidad del sistema RNAV. Explicita también cómo debe operar el equipo embarcado en la infraestructura de radioayudas para cumplir con los requisitos pertinentes del espacio aéreo. Dentro de la especificación, pueden darse dos tipos: RNAV y RNP (del inglés *Required Navigation Performance*).

Estos elementos quedan ilustrados en la Figura 5.1, donde es posible también observar el papel de la navegación PBN en el espacio aéreo:

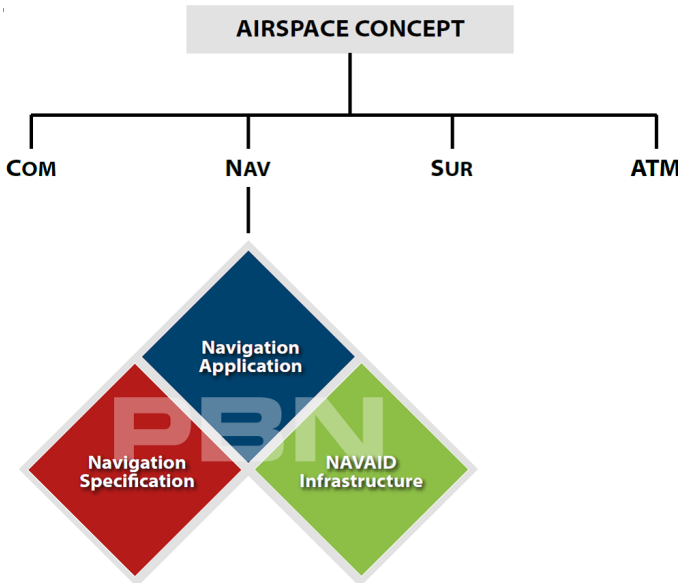


Figura 5.1: Componentes básicos de la navegación PBN [32]

Sintetizando, el concepto PBN requiere el uso de equipación específica a bordo de las aeronaves, creando requerimientos de certificación de aeronavegabilidad y de operación para el uso de estos sistemas en operaciones de navegación. La funcionalidad de los mismos, junto con su precisión, deben definirse conforme a los requisitos correspondientes a la especificación de navegación que corresponda; dicho de otra forma, tanto la aeronave como la tripulación deben estar certificados en base a las especificaciones requeridas por la operación.

Igualmente, desde el punto de vista del planificador del espacio aéreo, PBN permite integrar la separación entre aeronaves de manera sistemática en el propio espacio aéreo, reduciendo el grado de intervención del control aéreo.

5.3 Especificaciones PBN

Las especificaciones de navegación prescriben las prestaciones que deben cumplir las operaciones en una región particular del espacio aéreo, en términos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. Mencionado anteriormente, también especifican las funcionalidades que deben cumplir los sistemas o la certificación que debe superar tanto la aeronave como la tripulación. Adicionalmente, se detallan los sensores de navegación (tipo y número) que debe integrarse en el sistema [33].

Dentro de las especificaciones de navegación, se hallan dos tipos diferentes de las mismas. Para ambos, la designación "X" junto al término de la especificación (RNAV o RNP) hace referencia a la precisión lateral de navegación, en millas náuticas, esperada durante el 95 % del tiempo de vuelo por todas las aeronaves operando en el espacio aéreo, ruta o procedimiento designado.

No obstante, esta cifra, indicadora de la precisión requerida, no es la única implicada en la descripción de la especificación, haciendo falta conocer los restantes parámetros (integridad, disponibilidad, continuidad), así como los sensores, las funciones del sistema o la certificación pedidas. Por ello, una aeronave aprobada para una especificación concreta (p. ej. RNAV 1) no tiene porqué estarlo para otra más laxa en cuanto a precisión, al no conocer el resto de elementos de la misma ni los requerimientos funcionales a los que se somete [34].

La **navegación de área o RNAV** consiste en el método de navegación que permite la operación de la aeronave mediante cualquier ruta aérea dentro de la cobertura proporcionada por las radioayudas o sistemas de navegación existentes. Su fundamento es la navegación punto a punto, mediante el empleo de elementos conocidos como *waypoints*. Los *waypoints* son puntos 2D definidos por su latitud y longitud (plano horizontal), utilizados para definir la ruta de vuelo. Aunque su posición puede determinarse mediante radiobalizas, comúnmente se emplean sistemas GNSS para su localización.

La precisión determinada para este tipo de procedimientos depende en gran medida de los servicios ATC, siendo el valor impuesto aquel que éstos consideraran aceptable para mantener los valores de separación entre las aeronaves.

Mediante RNAV es posible establecer rutas fijas, promulgadas en las cartas aeronáuticas, complementarias a las rutas existentes de radionavegación. Además, existe la posibilidad de crear rutas no restrictivas, permitiendo a los pilotos seguir rutas no presentes en las cartas, término conocido como *free routing*; no debe confundirse con el concepto de vuelo libre, puesto que la ruta a seguir debe comunicarse en el plan de vuelo.

La **navegación RNP** sigue los principios establecidos en las especificaciones RNAV, aumentando la precisión (permitiendo menor separación, tramos curvos o aproximaciones mediante descenso continuo o CDA), exigiendo además la monitorización y alerta de la precisión para mantenerla dentro del límite de la especificación (vigilando, por tanto, la integridad y continuidad).

La monitorización de la integridad debe realizarse con los equipos adecuados (RAIM), permitiendo la desconexión automática o la generación de avisos cuando la información recibida no sea fiable, o ésta no se encuentre disponible.

Actualmente, y desde 2013, se recogen 11 especificaciones de navegación diferentes, 4 de las cuáles pertenecen a RNAV, y las 7 restantes a RNP. Las mismas se ilustran en la Figura 5.2:

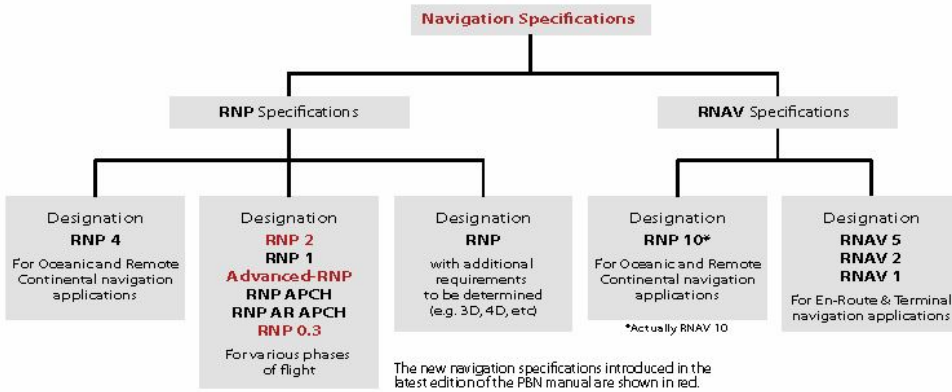


Figura 5.2: Especificaciones de navegación [32]

La especificación *Advanced-RNP* es la evolución de RNP, ideada con el objetivo de aplicarla en todas las fases del vuelo, facilitando así su aprobación para los operadores reduciendo el coste. Esta especificación permite reducir la separación lateral existente entre aeronaves, manteniendo el mismo espacio entre

rutas, disminuir las áreas de espera en vuelo, permitir aproximaciones curvas y mayor efectividad en la separación vertical de las aeronaves.

5.4 Especificaciones en aproximaciones (RNP APCH)

Anteriormente, los procedimientos de aproximación que una aeronave podía emplear se basaban en la infraestructura disponible en las cercanías del aeródromo, y de su publicación en las cartas aeronáuticas correspondientes. Ejemplos típicos de estas aproximaciones son las conocidas como aproximaciones de precisión, en las que existe guiado vertical (p. ej. ILS o MLS), y las aproximaciones de no precisión, que proporcionan solamente guiado en el plano horizontal (p. ej. VOR, LOC o NDB).

La tecnología GNSS ha permitido la aparición de nuevos procedimientos basados en las constelaciones primarias, y en los sistemas de aumentación (como SBAS o GBAS), habilitando el empleo de navegación PBN para las aproximaciones. Actualmente, las aproximaciones se pueden clasificar siguiendo tres criterios diferentes: según el tipo de navegación (convencional o PBN), según el ángulo con el que se vuela el segmento final de la aproximación (directa o circular), y según el tipo de guiado vertical.

Adicionalmente, se puede establecer una nueva diferenciación entre aproximaciones en base a la altura de descenso mínimo o altura de decisión, encontrando aproximaciones de tipo A (cuando este dato es superior a los 75 metros o 250 pies) y aproximaciones de tipo B (cuando el valor mencionado es menor a 75 metros o 250 pies) [35].

La clasificación de interés actual es aquella que distingue entre aproximaciones de no precisión (NPA *approaches*), aproximaciones con guiado vertical (APV *approaches*), y aproximaciones de precisión (PA *approaches*). Un esquema completo de las mismas es el mostrado en la Figura 5.3:

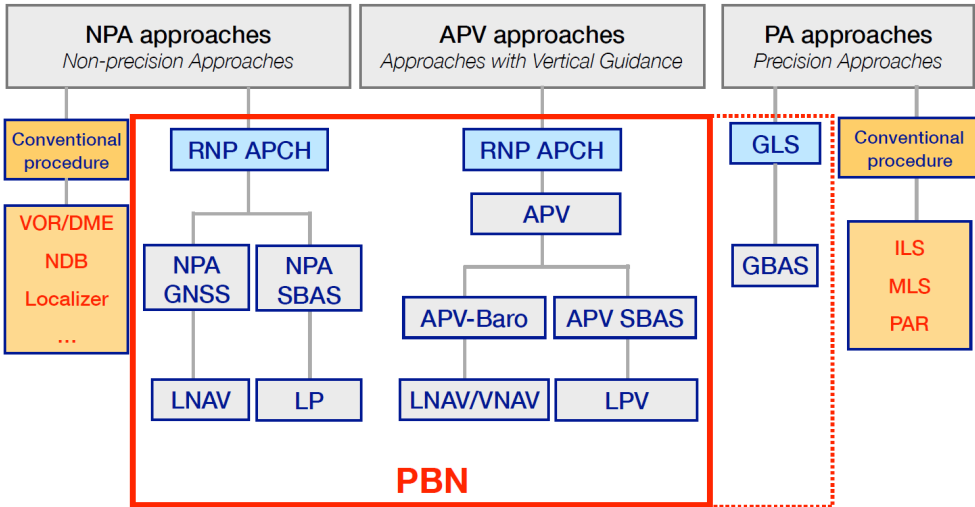


Figura 5.3: Aproximaciones según el tipo de guiado vertical [31]

Se describen, a continuación, las aproximaciones que se incluyen en la especificación RNP APCH:

- Aproximaciones LNAV (*Lateral Navigation*): Son aquellas aproximaciones de no precisión (sin guiado vertical), que emplean los sistemas GNSS para su posicionamiento 2D. El guiado lateral proporcionado por este método es equivalente al obtenido mediante el localizador del ILS. Al ser de no precisión, la aproximación puede realizarse hasta la altitud/altura mínima de descenso (MDA/H), y nunca más allá del punto de frustrada (MAPT). Tratándose de un procedimiento RNP, es necesaria la monitorización de la integridad mediante el uso del sistema RAIM.
- Aproximaciones LP (*Localizer Performance*): Este tipo de aproximaciones se diferencia del anterior en que emplea sistemas de aumentación basados en satélite o SBAS para obtener guiado lateral equivalente al proporcionado por el sistema localizador de un ILS, obteniendo mayor precisión que en la operación previa. Como en el caso anterior, la aproximación se realizará hasta la MDA/H, y requerirá monitorización de la integridad.
- Aproximaciones LNAV/VNAV (*Lateral Navigation/Vertical Navigation*): Las aproximaciones LNAV/VNAV son aproximaciones de precisión (con guiado vertical) que utilizan sistemas GNSS para el guiado lateral, y un

barómetro para obtener la altitud mediante medidas de presión para el guiado vertical. Deben emplearse sistemas de compensación de temperatura para controlar el funcionamiento del barómetro, y su integridad queda supeditada al uso de sistemas externos, como el altímetro principal. Siendo una aproximación de precisión, la misma tiene lugar hasta la altitud/altura de decisión (DA/H). La integridad es monitorizada mediante sistema RAIM.

- Aproximaciones LPV (*Localizer Performance with Vertical guidance*): Este tipo de aproximaciones de precisión emplea sistemas de aumentación SBAS para ambos guiados, obteniendo mayor precisión. La integridad es proporcionada, en este caso, mediante el sistema de aumentación. El procedimiento en cuestión contará con un valor asociado de DA/H.

5.4.1 LPV-200

Los procedimientos de precisión mediante sistemas SBAS (LPV) proporcionan un método de aproximación equivalente al ILS, dependiendo los mínimos de la operación de la infraestructura aeroportuaria y de los posibles obstáculos cercanos al aeródromo [36].

La mejora en la prestaciones del procedimiento, obtenida mediante sistemas de aumentación, puede permitir la reducción de estos mínimos. En la actualidad, el empleo del sistema EGNOS en las aproximaciones LPV permite realizar aproximaciones instrumentales 3D en cumplimiento con las prestaciones recogidas en el Anexo 10 de la OACI, pudiendo reducir la altura de decisión hasta los 200 pies, recibiendo de este modo la aproximación el nombre de LPV-200 y siendo equivalente a una aproximación mediante ILS de categoría I (ILS *look-alike*) [37].

Este tipo de operaciones se encuentran disponibles desde septiembre de 2015, y no requieren de infraestructura adicional al basarse en el sistema SBAS europeo, suponiendo coste cero para los gestores aeroportuarios.

Los beneficios de este servicio derivan de la seguridad y fiabilidad de las aproximaciones instrumentales de categoría I, unidas a la flexibilidad de diseño y exigencia propias de una operación PBN: reducción de riesgos en condiciones climáticas adversas, mayor accesibilidad a los aeropuertos, reducción en el número de retrasos y cancelaciones, mayor capacidad y eficiencia, menor consumo y reducción de emisiones de CO₂ [38].

En adición, el sistema goza de mayor estabilidad y fiabilidad en términos de señal, evitando las interferencias de señal propias del ILS, además de posibilitar el empleo de la señal GPS en todas las fases de aproximación, suprimiendo la necesidad de cambiar entre sistemas durante la preparación de la aproximación, con la consecuente reducción en la carga de trabajo de los pilotos y la menor posibilidad de error humano que esto conlleva. La demostración inicial de este tipo de operaciones se llevó a cabo en mayo de 2016, en el aeropuerto parisino Charles de Gaulle (LFPG), donde un Airbus A350 efectuó con éxito la primera aproximación LPV-200 [39].

La eliminación del ILS añadiría como ventajas, además, la supresión de otras desventajas asociadas a su uso (área limpia, perturbaciones en la senda de planeo, limitaciones de temperatura), así como el ahorro en gastos de mantenimiento por parte del aeropuerto.

La implementación de operaciones SBAS en los Estados Unidos de América, basadas en el sistema WAAS, es prácticamente total. En Europa, el proyecto se encuentra en fase de desarrollo, implementándose en diferentes aeropuertos del continente con el objetivo de convertirse en el referente en operaciones de aproximación. La situación actual es la mostrada al inicio del trabajo, en el apartado introductorio (Figura 1.1).

El proceso avanza a ritmo pausado en nuestro país. La Figura 5.4 ilustra esta evolución, mostrando en color verde aquellos aeropuertos donde las operaciones LPV se encuentran disponibles, y en ocre, aquellos en los que se encuentran planificadas:



Figura 5.4: Aproximaciones LPV en España [4]

Actualmente, cuatro aeropuertos españoles disponen de este tipo de aproximaciones: el aeropuerto de Santander (LEXJ, disponible desde octubre de 2013), Almería (LEAM, operativo desde febrero de 2017), Valencia (LEVC, presente a partir de febrero de 2018) y Palma de Mallorca (LEPA, instaurado en marzo de 2018). El objetivo pasa por llevar estos procedimientos a aeropuertos de mayor envergadura, como Madrid-Barajas (LEMD), Barcelona El Prat (LEBL) y Alicante (LEAL). Aerolíneas como Air Baltic o Swiss International Air Lines hacen uso del servicio en nuestro país, y otras como Air Nostrum o EasyJet se encuentran en proceso de implementación.

El establecimiento de LPV-200 en los aeropuertos españoles sigue un desarrollo lento con sucesivos retrasos en la consecución del plan establecido debido a la dificultad en la certificación y validación de los procedimientos. No obstante, se prevé finalizar su implantación en el horizonte de 2020, facilitando así las operaciones y reduciendo el coste de infraestructura y mantenimiento,

formando parte así del plan europeo de desarrollo de procedimientos basados en EGNOS.

5.5 SESAR

La evolución del transporte aéreo ha sido muy desigual en los Estados Unidos y en Europa. En el siglo XX, la estructura de navegación presente en el país americano se encontraba integrada en un único espacio aéreo civil, al contrario de lo ocurrido en Europa, donde no existía tal espacio manejado a nivel europeo. Este elemento es clave en el sector de la navegación aérea mundial, representando uno de los espacios aéreos más transitados con alrededor de 33000 vuelos al día y una gran densidad aeroportuaria, dificultando el control del tráfico aéreo.

Además, la contribución de este sector a la economía europea es muy significativa. La gestión eficiente de este recurso se convierte entonces en una prioridad para la Unión Europea. Es así como, en el año 2004, se lanza la iniciativa del Cielo Único Europeo, con el objetivo de reestructurar el espacio aéreo nacional de cada miembro de la unión, y modernizar la infraestructura de gestión del tráfico aéreo para proporcionar el aumento de capacidad requerido por un sector en constante crecimiento [40].

Sin olvidar el progreso realizado hacia la consecución del cielo único, los volúmenes de tráfico aéreo cada año son mayores, requiriendo aumentos constantes de la capacidad de infraestructura y espacio aéreo minimizando su impacto en el entorno, armonizando procedimientos y mejorando en la faceta tecnológica de los mismos. Lograr estos objetivos supone la creación, por parte de la Comisión Europea, del programa SESAR.

El programa de Investigación ATM para el Cielo Único Europeo (SESAR) es el proyecto colaborativo destinado a revisar al completo el espacio aéreo europeo y la gestión del mismo. Es liderado por la Iniciativa Común SESAR (del inglés *Joint Undertaking*), mediante una colaboración público-privada (PPP). Se espera su compleción para el año 2020, habiendo superado para dicha fecha tres fases de desarrollo.

La **fase de definición** (2004-2008) finalizó con la creación de un plan maestro de ATM, definitorio del contenido y planes de desarrollo para la próxima generación de sistemas ATM. Fue liderada por EUROCONTROL y el consorcio contratado por esta entidad.

La siguiente etapa, conocida como **fase de desarrollo** (2008-2014), es la encargada de producir y diseñar los sistemas tecnológicos y componentes definidos en la fase previa. Con un presupuesto de 2.1 billones de euros, la misma corre a cargo de la Iniciativa Común SESAR.

La **fase de despliegue** (2014-2020) está orientada a la producción a gran escala y la implementación de la nueva infraestructura, formada por componentes interoperables que garanticen altas prestaciones en el sector de las actividades europeas de transporte, bajo la coordinación y participación de los principales proveedores de servicio europeos. Entre las áreas de actividad, destaca la implementación de aproximaciones RNP en todo el territorio, incluyendo las operaciones LPV-200. Se persigue así la unificación de requisitos y operaciones a nivel europeo.

Para finalizar, el proyecto de próxima generación de sistemas de transporte aéreo, conocido como NextGen, consiste en la modernización del espacio aéreo estadounidense, iniciado por la FAA en el año 2007. Se espera su finalización para el año 2025. Como objetivos, contempla el uso de nueva tecnología y procedimientos que permitan mejorar la capacidad, acceso y eficiencia del sistema, reduciendo el impacto medioambiental de los vuelos. En junio de 2010, las autoridades europeas y americanas llegaron a un acuerdo de interoperabilidad entre ambos proyectos de cara a su desarrollo futuro.

Validación de procedimientos PBN

El proceso de validación de un procedimiento PBN está basado en el manual de la OACI dedicado a la navegación basada en prestaciones, recogido en el Documento 9613 [34].

En el mismo, se detallan los requisitos operacionales y de aeronavegabilidad necesarios para una operación RNP APCH como la detallada en este proyecto. El cumplimiento de las mismas es indispensable para la validación del procedimiento. Por otra parte, el uso del Servicio *Safety of Life* de EGNOS conlleva la determinación de unos mínimos de operación que deben cumplirse para su correcto empleo, y que se definirán más adelante.

El capítulo actual tratará, por tanto, los requisitos incluidos en el Documento 9613 relativos a las operaciones RNP APCH, y pasará a especificar los requisitos aplicables al sistema EGNOS en aproximaciones LPV, pudiendo definir, finalmente, los mínimos que deben cumplirse para determinar la validación del procedimiento y el proceso a seguir.

6.1 Especificaciones de navegación

La especificación de navegación para operaciones RNP APCH se establece mediante el manual mencionado, siguiendo una serie de puntos clave relacionados con el proceso de aprobación, la aeronave o la tripulación. La especificación de navegación constituye un listado de recomendaciones para la aprobación del procedimiento, recayendo ésta última en manos del Estado u operador de navegación. Proporciona criterios técnicos y operacionales para la aproximación, pero no establece la necesidad de recertificación de ningún elemento. La realización de una operación RNP APCH pasa por la realización de los siguientes pasos:

- La **elegibilidad del equipamiento** de la aeronave debe determinarse y documentarse. Dichos documentos deben demostrar que la aeronave cuenta con los sistemas RNAV necesarios, en cumplimiento con los requerimientos RNP APCH.
- Debe documentarse los **procedimientos de navegación** que seguirán los sistemas de navegación y la base de datos de navegación.
- La tripulación de la aeronave debe ser **entrenada en base al procedimiento** seguido, y certificada.
- Los documentos surgidos de los pasos previos deben ser **aceptados por la entidad regulatoria** pertinente.
- Finalmente, la **aprobación operacional** debe obtenerse en consonancia con las normas de operación nacionales.

6.1.1 Requisitos de la aeronave

Se establecen los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad aplicables a la aeronave y al sistema de navegación incorporado.

La precisión de la operación variará con el segmento de la aproximación que se esté volando, siendo más crítica la parte final de la misma, donde los errores de sistema deben mantenerse inferiores a 0.3 millas náuticas durante el 95 % del tiempo de vuelo. La integridad se especifica como la probabilidad de que ocurra un evento de integridad por hora. La pérdida de continuidad se clasifica como un fallo menor si es posible emplear sistemas adicionales de navegación y finalizar la operación.

Para el cumplimiento de estos requisitos, es necesario un sistema de alerta y monitorización de las prestaciones (al tratarse de un procedimiento RNP), que avise al sistema cuando la especificación no se cumpla o la precisión caiga por debajo del valor umbral establecido. Del mismo modo, las características de la señal de navegación deben vigilarse, procediendo de igual forma cuando las prestaciones se incumplen.

La información relativa a la navegación y los posibles fallos del sistema RNAV deben mostrarse en instrumentos adecuados (indicadores laterales, pantallas, mapas electrónicos), empleándose éstos como método de navegación primario. Las pantallas deben situarse en la zona de visión del piloto, y convenientemente enlazadas con la senda de navegación, mostrando en todo momento la escala de error adecuada. Como funcionalidades mínimas, se establece una base de datos actualizada con datos promulgados por las autoridades de aviación civil, capacidad para conectar la base de datos con el sistema RNAV, y capacidades básicas de navegación RNAV (muestra en pantalla de la ruta y los *waypoints*, navegación directa, secuenciación de tramos, transiciones entre fases de vuelo).

6.1.2 Procedimientos de operación

La certificación de aeronavegabilidad de una aeronave no permite, de manera automática, realizar una operación RNP APCH. Es necesaria la aprobación operacional que confirme las capacidades de la instalación para este tipo de aproximaciones.

Durante la planificación del vuelo, los operadores del vuelo y los pilotos deben rellenar el plan de vuelo correspondiente para esta aproximación, aseverando la validez de los datos de navegación con los que cuenta la aeronave. Debe comprobarse la validez de la aproximación volada, teniendo en cuenta medios alternativos para el vuelo en caso de pérdida del servicio RNP. La tripulación y los pilotos tomarán nota de aquellos NOTAMs que puedan afectar a la operación.

La disponibilidad del sistema de aumentación correspondiente también debe estudiarse, asegurando las prestaciones de la especificación, especialmente en materia de integridad, para los sistemas SBAS y ABAS (RAIM y predicción de la integridad).

Con anterioridad al vuelo, a los procedimientos ordinarios se debe añadir la comprobación de la secuencia de *waypoints*, y la ruta descrita en el sistema de navegación, así como las cartas de navegación relacionadas con la ruta. Debido

al alto número de sensores presentes, la tripulación debe comprobar que el sistema GNSS es el empleado para obtener el posicionamiento de la aeronave.

Durante el procedimiento, la aeronave debe hallarse preparada para volar el tramo final con anterioridad al Fijo de Aproximación Final (FAF), debiendo abortar la operación si se incumplen las prestaciones o el sistema se encuentra en estado no disponible, procediendo con una maniobra de frustrada según lo indicado en las cartas aeronáuticas.

6.1.3 Programa de formación

El programa de formación ideado para instruir a la tripulación de vuelo y a los pilotos debe proporcionar el conocimiento y la práctica necesarios, mediante los elementos que se consideren oportunos (p. ej. simuladores, dispositivos o aeronaves de prueba), para conocer y manejar de manera óptima el sistema RNP, más allá de formar a los pilotos para seguir órdenes derivadas del sistema.

En particular, los mismos deberían ser instruidos en el conocimiento del Documento 9613, el significado y uso de los sistemas RNP y las características del procedimiento. Para ello, deben manejar la navegación basada en prestaciones, los tipos de *waypoint* existentes, la nomenclatura relacionada y el equipamiento GNSS.

La formación en materia RNP debe ser extensa, otorgando conocimiento en todas las áreas específicas de estos sistemas: niveles de automatización, alertas, cambios, degradación de las prestaciones, monitorización en cada fase del vuelo, tipos de sensores empleados en operaciones RNP e interpretación de pantallas electrónicas y símbolos. Igualmente, deben mostrar maestría en el conocimiento de los procedimientos RNAV básicos, siendo capaces de verificar información RNAV, volar aproximaciones RNP APCH, pilotar de acuerdo a las indicaciones del sistema, determinar errores del sistema y modificar la ruta definida en casos de fallo o desconexión.

6.2 Requerimientos de señal en aproximaciones LPV-200

Las aproximaciones LPV-200, disponibles mediante el uso del sistema de aumentación europeo EGNOS, permiten obtener procedimientos equivalentes a las aproximaciones ILS de Categoría I, con las ventajas que presenta la ausencia de este dispositivo. La provisión de este tipo de operaciones se enmarca en el servicio *Safety of Life*, destinado a aplicaciones críticas de navegación; para

poder emplearse, es necesario que la señal generada y emitida por EGNOS cumpla una serie de requisitos, establecidos por la OACI, que aseguren su fiabilidad y determinación en términos de precisión, disponibilidad, continuidad e integridad.

Los requisitos de señal, dependientes del tipo de operación, se muestran en la Figura 6.1:

	Accuracy		Integrity				Continuity	Availability
Typical operation	Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)	Horizontal Alert Limit (HAL)	Vertical Alert Limit (VAL)		
En-route (oceanic/continental low density)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	7.4 km (4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
En-route (continental)					3.7 km (2 NM)	N/A		
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	1.85 km (1 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	556 m (0.3 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	40 m (130 ft)	35.0 m to 10.0 m (115 ft to 33ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Figura 6.1: Requerimientos de señal en el servicio *Safety of Life* [29]

Para el proyecto actual, los valores de interés corresponden con la última fila de la tabla, referidos a las aproximaciones de precisión de Categoría I. Cabe recordar que LPV-200 es equivalente a este tipo de aproximaciones.

A la hora de comprobar el cumplimiento de esta especificación, es necesario verificar, en primer lugar, las prestaciones que permite obtener EGNOS para operaciones LPV-200 en territorio europeo, en base a la información proporcionada por el propio servicio *Safety of Life*. Consultando el documento de definición del servicio, es posible obtener el rendimiento de la señal en términos de disponibilidad y continuidad, mostrados sobre un mapa político (Figuras 6.2 y 6.3):

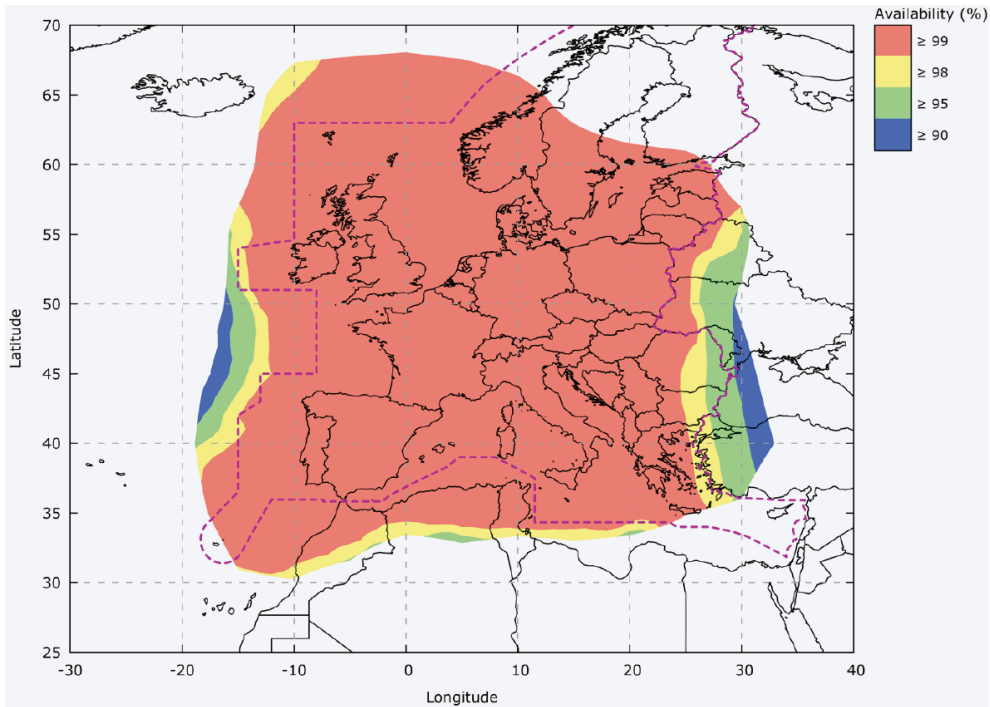


Figura 6.2: Disponibilidad de las operaciones LPV-200 en Europa [29]

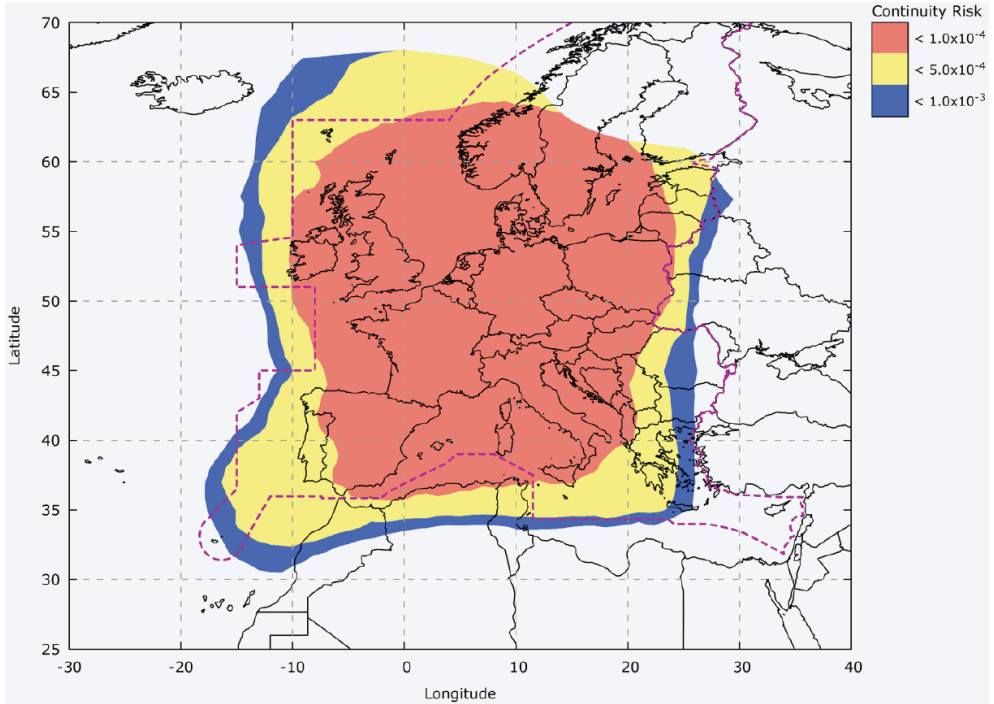


Figura 6.3: Continuidad de las operaciones LPV-200 en Europa [29]

En cuanto a la precisión, la Figura 6.4 muestra los valores obtenidos para operaciones LPV-200, junto con el requisito establecido por la OACI para su correcta operación:

	Definition	Value	APV-I requirement
Horizontal	Corresponds to a 95% confidence bound of the 2-dimensional position error ¹⁷ in the horizontal local plane for the Worst User Location ¹⁸	3m	16m
Vertical	Corresponds to a 95% confidence bound of the 1-dimensional unsigned position error in the local vertical axis for the Worst User Location	4m	6m to 4m

Figura 6.4: Precisión de las operaciones LPV-200 en Europa [29]

Puede verse como, para todos los casos, es posible la realización de aproximaciones LPV-200 en la zona de Levante. Resulta factible, por tanto, proponer un método de validación y proceder con su realización.

6.3 Proceso de validación

Siguiendo las recomendaciones presentes en el manual de navegación PBN promulgado por la OACI (Documento 9613), se propone un método de validación de procedimientos basado en tres fases diferentes, agrupadas en dos secciones: validación en tierra (evaluación a largo plazo y evaluación a corto plazo), y validación en vuelo.

En las tres fases, cuya definición se expondrá a continuación, la metodología cambia pero el objetivo persiste: la fase en cuestión quedará validada cuando las prestaciones relativas a precisión, integridad, continuidad y disponibilidad para una cierta operación se cumplan.

6.3.1 Evaluación a largo plazo

La fase de evaluación a largo plazo es la primera fase que completar para la validación de un procedimiento PBN, siguiendo las recomendaciones de la OACI. Su realización consiste en el estudio de la señal EGNOS y sus prestaciones durante un período de 6 meses, comprobando que las mismas se adhieren a la operación particular a validar.

Los datos necesarios, provenientes de las diferentes estaciones RIMS diseminadas por el continente, pueden obtenerse desde la página web del proveedor del servicio EGNOS, ESSP, encargado de publicar informes mensuales de prestaciones. Debe escogerse una estación cercana a la zona del estudio, minimizando así el error producido por diferentes mediciones.

6.3.2 Evaluación a corto plazo

La segunda fase de validación, conocida como evaluación a corto plazo o campaña sobre el terreno, tiene por objetivo la comprobación de los parámetros anteriores en el propio entorno de la operación. Para ello, resultan de utilidad los datos obtenidos directamente de la estación de estudio. Los mismos deben recogerse durante un período mínimo de 36 horas, siendo común emplear 5 días al completo para mayor fiabilidad.

Los datos obtenidos mediante estas dos evaluaciones, son analizados con posterioridad mediante software específico (PEGASUS), cuyo funcionamiento será explicado posteriormente. En el proyecto que atañe actualmente, la realización de ambas fases ha corrido a cargo de los Trabajos Fin de Grado de María del Carmen Furquet [41] y Moisés Linares [42], demostrando que, en el caso de una aproximación LPV-200, se cumplen los requisitos de señal establecidos.

6.3.3 Ensayo de vuelo

Para finalizar, resta la tercera y última fase del proceso, consistente en un ensayo de vuelo con la aeronave que realizará el procedimiento. La toma de datos se realizará mediante un receptor certificado a bordo del aparato, y serán procesados al finalizar mediante el software apropiado. Idealmente, la aeronave escogida será apta para la especificación de navegación RNP definida.

Habiendo validado las fases previas, el proyecto presente procederá con la realización de la última fase, tras la cual será posible determinar la validación de la aproximación LPV-200 en la zona de estudio.

Capítulo 7

Normativa y seguridad operacional aplicada al sector de los drones

La validación del procedimiento LPV-200 consta de tres fases, siendo la tercera la que atañe al Trabajo Fin de Grado presente. La realización del ensayo de vuelo mediante un receptor certificado culminará mediante el empleo de una aeronave controlada de manera remota para la realización de la aproximación.

La Real Academia Española de la lengua define el término dron como "aeronave tripulada", derivada del término inglés *drone* [43]. Se entiende por dron, aquel aparato o aeronave destinada al vuelo sin tripulación, que puede ser autónoma o controlada a distancia. El sector de los drones ha experimentado un gran auge en los últimos años, pasando de ser un pequeño nicho de mercado orientado a los aficionados por el radiocontrol y aeromodelistas, con aplicaciones específicas en el ámbito militar, a un segmento de mercado de gran envergadura, debido al gran número de operadores presentes en nuestro país, el creciente número de *startups* y soluciones bajo el paraguas de este concepto, y la multitud de aplicaciones que han surgido empleando los drones como vehículo de la operación.

En el sector de ocio o recreativo es donde más fácilmente puede constatarse este crecimiento, controlado casi en su totalidad por la multinacional procedente de China, DJI. La firma asiática controla el 90 % de las ventas de estos aparatos y, únicamente en territorio americano, llega a facturar alrededor de los 1000 millones de dólares anuales. La rápida expansión y aparición de estos sistemas ha propiciado la instauración de normativas exigentes que han frenado el crecimiento de empresas locales y nacionales, ante la invasión que pueden suponer estos elementos. Tras la promulgación del Real Decreto de 2014 en el que se hacía referencia a la situación de estos sistemas, la publicación del Real Decreto de finales de 2017 establece una serie de medidas regulatorias con las que establecer un marco legal en un mercado desprovisto del mismo desde su nacimiento en nuestro país.

En cambio, al hablar del sector profesional, el reparto del mismo es más equitativo, existiendo gran cantidad de empresas innovadoras apostando por soluciones diversas en campos como la agricultura, georreferenciación, extinción de incendios, salvamento, e incluso publicitario o multimedia, fomentando la competitividad entre empresas.

El sector militar, por otra parte, comprende los departamentos específicos de empresas como Airbus, Boeing, Lockheed Martin o Northrop Grumman, y se encuentra dominado ampliamente por productos procedentes de los Estados Unidos o Israel, dejando poco campo de acción a la industria aeronáutica europea, la cuál trabaja en un proceso de renovación y desarrollo para equipararse con el resto de actores comerciales [44].

A lo largo de las siguientes páginas, se introducirán los conceptos necesarios para el conocimiento de la normativa en materia de drones y el estudio de la seguridad operacional: comenzando con un pequeño apunte aclaratorio sobre la terminología empleada para referirse a los mismos, se procederá con el Real Decreto que regula el uso civil de estas aeronaves, y se culminará el capítulo presentando la metodología SORA para la evaluación de la seguridad operacional en drones.

7.1 Terminología

En la actualidad, las aeronaves no tripuladas reciben diversos nombres: drones, UA, UAV, RPAS... Con este punto aclaratorio, se pretende establecer la diferencia entre las mismas, para favorecer el uso correcto de cada término.

El origen del término dron debe buscarse en el ámbito militar. En la década de los 40, Inglaterra había desarrollado uno de primeros vehículos pilotados de forma remota sin tripulación, con carácter militar, conocido como abeja asesina (del inglés *killerbee*). Posteriormente, la creación de una unidad de observación sin fines bélicos, recibió el nombre de *drone*, cuya traducción literal sería la de "zángano".

La evolución y desarrollo de estas aeronaves, principalmente desde el sector militar, conlleva el uso de término Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*). En la actualidad, este término está en desuso, en comparación con otros vocablos.

Como términos más generales, pueden encontrarse el de Aeronave No Tripulada (UA, *Unmanned Aircraft*), donde no se especifica si existe piloto o no, pasando a ser una Aeronave por Control Remoto (RPA, *Remotely Piloted Aircraft*) si existe un piloto a distancia, o una aeronave autónoma.

Haciendo referencia al sistema completo, el UA pasa a convertirse en Sistema Aéreo No Tripulado (UAS, *Unmanned Aerial System*), al tener en cuenta no sólo la aeronave, sino el enlace de comunicaciones y la estación de tierra. Igual sucede con el RPA, que pasa a denominarse Sistema Aéreo por Control Remoto (RPAS, *Remotely Piloted Aircraft System*). De todos los términos propuestos, este resulta ser el preferido por la mayoría de autoridades en materia de aviación, como la OACI o EUROCONTROL.

De todos ellos, el que más se emplea, sobre todo en el ámbito no profesional, resulta ser el término dron, que complica la tarea de unificación y empleo de un único término. El resumen de los términos presentados puede verse a continuación:

Dron Término popular, ampliamente extendido para referirse a las aeronaves no tripuladas de cualquier clase, de origen militar.

UA Concepto genérico referente a las aeronaves no tripuladas, sin especificar si son autónomas u operan bajo control remoto.

UAS Similar al término anterior, pero integrando el dispositivo al completo, incluyendo el enlace de comunicaciones y la estación terrestre.

UAV Vocablo en desuso, de ámbito militar.

RPA Término que hace referencia las aeronaves no tripuladas por control remoto.

RPAS Extensión del término previo al sistema completo, y el más utilizado por las autoridades de aviación.

Aeronave autónoma Aeronave capaz de operar de manera independiente, sin requerir intervención humana.

7.2 Normativa española sobre aeronaves no tripuladas

La normativa referente a aeronaves no tripuladas aplicable en el Estado español proviene del Real Decreto 1036/2017, publicado en el Boletín Oficial del Estado número 316, el viernes 29 de diciembre de 2017 [45]. Se proporciona, en esta sección, un resumen del mismo, con los puntos y artículos más relevantes incluidos en la normativa reciente.

El objetivo del real decreto es el de establecer un régimen jurídico de aplicación a las aeronaves civiles pilotadas por control remoto (RPA). Las actividades aéreas no recogidas en el decreto estarán sujetas a la habilitación previa por parte de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). El documento y las directivas recogidas en el mismo son de aplicación a todas las aeronaves RPA cuya Masa Máxima de Despegue (MTOM) sea inferior a 150 kilogramos, y a cualquier RPA que efectúa actividades de aduanas, policía, búsqueda y rescate, lucha contra incendios y similares, sin importar su MTOM, así como a aquellos elementos que configuran los sistemas RPAS. Quedan exentos de aplicación globos libres, vuelos de interior, RPAS militares, y RPA cuyo MTOM exceda los 150 kilogramos. Tanto el territorio español como el espacio aéreo de soberanía española (y el espacio aéreo en el que el Estado español preste servicios de tránsito aéreo) se ven afectados por la publicación del decreto.

El Artículo 4, de gran brevedad, explicita que el uso de RPA estará condicionado a que el piloto de la aeronave puede intervenir el control del vuelo en todo momento, siendo responsable de detectar y evitar colisiones y demás peligros. Seguidamente, el Artículo 5 expone una serie de definiciones que clarifican la comprensión del decreto.

Entrando en el Capítulo II, se definen los requisitos de los sistemas RPAS. Según el Artículo 8, todas las aeronaves RPA deberán tener fijada una plaza de identificación ignífuga, que describa la identificación de la aeronave (fabricante, tipo, modelo, número de serie), el nombre del operador y los datos de contacto. Adicionalmente, las aeronaves RPA cuya MTOM supere los 25 kilogramos deberán inscribirse en el Registro de Matrícula de Aeronaves Civiles y obtener el certificado de aeronavegabilidad correspondiente.

El Artículo 16 establece las responsabilidades en cuanto al mantenimiento de los RPA, debiendo existir un manual o conjunto de los mismos que describan el mantenimiento, funcionamiento e inspección de la aeronave, elaborado por el fabricante. La realización de dichas tareas es responsabilidad del operador de la aeronave, asegurando que la misma mantiene las condiciones de aeronavegabilidad para las que fue fabricada.

Las condiciones de utilización del espacio aéreo se describen en el Capítulo III. Las aeronaves RPA sin certificado de aeronavegabilidad que realicen operaciones aéreas especializadas deberán evitar el sobrevuelo de aglomeraciones, edificios, ciudades y conjuntos de personas al aire libre, teniendo estas operaciones lugar en espacio aéreo no controlado y fuera de las Zonas de Información de Vuelo (FIZ) y siempre en Línea de Visión con el piloto (VLOS), o de observadores que estén en contacto permanente por radio con el piloto en Línea de Visión Extendida (EVLOS). La distancia máxima a la que podrá alejarse la aeronave es de 500 metros, con una altura máxima de 120 metros. Si el vuelo se produce más allá del alcance visual del piloto (BVLOS), bajo un enlace de control efectivo, podrán realizarse vuelos por RPA de hasta 2 kilogramos, o con sistemas aprobados por AESA para tales operaciones. El sobrevuelo de edificios o aglomeraciones con fines experimentales estará sujeto a RPA cuya MTOM no supere los 10 kilogramos, y cuya distancia al piloto no exceda los 100 metros; por el contrario, las aeronaves RPA con certificado de aeronavegabilidad que realicen operaciones aéreas especializadas estarán sujetas a las condiciones estipuladas en dicho certificado.

En cuanto a los requisitos de la operación (Capítulo IV), el operador del sistema deberá disponer de la documentación relativa a la aeronave de uso, y realizar un estudio aeronáutico de seguridad de la operación. Deberá disponer de una póliza de seguro, en caso de daños a terceros. El operador es responsable de la protección de la aeronave, adoptando las medidas adecuadas contra interferencia ilícita, y asegurando el cumplimiento de la normativa y de los requisitos exigidos al personal que realiza la operación.

El operador tendrá como deber establecer una zona de protección para el despegue y aterrizaje de la aeronave, despejando la zona en un radio de 30 metros para permitir la recuperación de la aeronave en caso de fallo, evitando daños a terceros. Para aeronaves con capacidad de despegue vertical, el radio se reduce a 10 metros.

El Capítulo V incluye información sobre el personal de vuelo. El Artículo 33 afecta a los pilotos remotos, que deberán ser mayores de edad, titulares de un certificado médico en vigor, conocedores de la teoría necesaria para la operación de la aeronave (certificado mediante un documento oficial firmado por una organización aprobada), y tener la calificación de radiofonista en caso de vuelos en espacio aéreo controlado. Para el caso de los observadores, éstos deberán exhibir y acreditar conocimientos teóricos correspondientes al de un piloto remoto.

la habilitación para el ejercicio de operaciones aéreas especializadas y vuelos experimentales se describe en el Capítulo VI. Según el Artículo 40, requerirán de autorización previa por parte de AESA, todas las operaciones experimentales o especializadas con RPA cuya MTOM sea mayor de 25 kilogramos, y aquellas que operen en espacio aéreo controlado.

Finalmente, la disposición adicional segunda da cabida a aquellas operaciones deportivas, recreativas, de competición, exhibición y lúdicas, estableciendo que deben operar a una distancia mínima de 8 kilómetros del punto de referencia de cualquier aeródromo, fuera del espacio aéreo controlado y zonas FIZ, sin sobrepasar una altura de 120 metros y siempre en alcance visual con el piloto (VLOS). El vuelo deberá ser diurno y en condiciones de visibilidad. En caso de que la aeronave tenga un MTOM de hasta 2 kilogramos, a una altura máxima de 50 metros sobre el terreno, podrá realizar vuelos nocturnos.

7.3 Metodología SORA

la operación de cualquier tipo de aeronave se ve sujeta a un estudio sobre seguridad operacional, al estar hablando de operaciones críticas donde la seguridad humana se puede ver afectada. Asimismo, la operación de la aeronave debe producirse dentro de los márgenes de seguridad dictados por las autoridades en materia de aviación civil. La metodología de Análisis del Riesgo Específico de la Operación (SORA) permite estudiar el riesgo asociado a una operación realizada mediante un RPAS, facilitando la determinación de la viabilidad de la operación.

La metodología SORA está pensada para ser aplicada en aquellos casos en los que la certificación tradicional no es de aplicación, debido a la necesidad de operar el RPAS de una manera específica que se ve limitada por los métodos corrientes de certificación. Se fundamenta en un modelo basado en la determinación del riesgo operacional del sistema en su conjunto (de manera holística), considerando cada riesgo que pueda afectar al sistema completo durante la operación para determinar los límites bajo los que tal operación será segura.

El Modelo Holístico de Riesgo (HRM) opera siguiendo cinco pasos: identificación del daño, identificación del riesgo, identificación de la amenaza, identificación de las barreras contra daño, e identificación de las barreras contra amenazas. De este modo, es posible conocer los posibles daños que afectarían a la aeronave, los riesgos relacionados con la operación que podrían desembocar en el daño descrito, las amenazas que podrían dar lugar a los riesgos descritos, y las barreras posibles que podrían implementarse para evitar los daños y los riesgos.

Conociendo estos parámetros, se procede con la metodología, mostrada en la Figura 7.1:

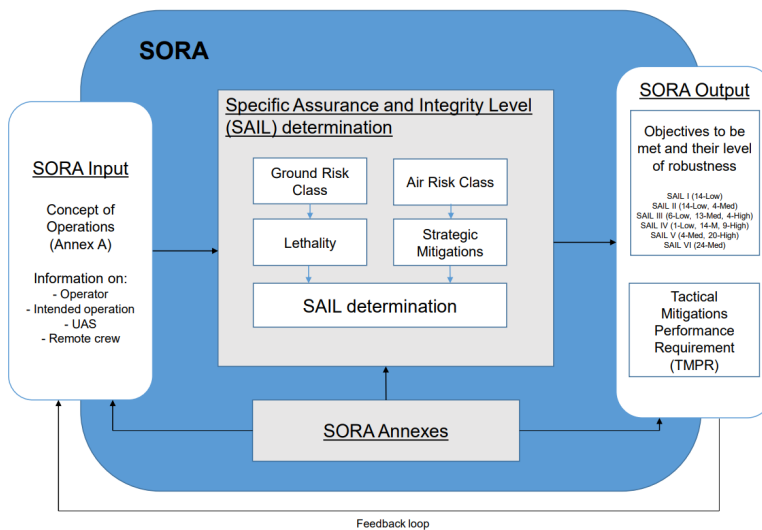


Figura 7.1: Metodología SORA [46]

Siguiendo el proceso, el método comienza utilizando la información sobre el operador, la operación, el sistema RPAS y la tripulación remota involucrada, para pasar a determinar los Niveles de Seguridad e Integridad Específicos (SAIL), obtenidos gracias al conocimiento de los riesgos, daños y amenazas existentes, junto con las barreras mitigadoras relacionadas. Se tiene en cuenta los riesgos terrestres y aéreos, la letalidad de los mismos y las estrategias de mitigación disponibles, obteniendo finalmente los objetivos que cumplir y su robustez en materia de seguridad operacional.

La metodología SORA ha servido de inspiración para el desarrollo de la normativa española, para armonizar de este modo los futuros estudios aeronáuticos relacionados con este campo. Este método corre a cargo de la Junta de Autoridades para la Regulación de los Sistemas No Tripulados (JARUS), en la que se agrupan expertos mundiales y colaboradores como EUROCONTROL [47].

Software empleado en el tratamiento de datos

Los usuarios de servicios de navegación GNSS emplean receptores certificados y específicos con los que recibir la señal de navegación, las correcciones de los satélites GEO y, en definitiva, la información enviada por la constelación de satélites. No obstante, dicha información debe ser almacenada siguiendo un estándar que permita su posterior proceso, y que soporte los diversos tipos de datos provenientes del segmento espacial.

Una vez estos datos han sido obtenidos, deben extraerse y postprocesarse para poder obtener la caracterización de la señal en términos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Es aquí donde el software juega un papel fundamental, facilitando la labor de transferencia y análisis de estos archivos. En las siguientes páginas se abordarán los dos programas más importantes utilizados en el desarrollo de este trabajo: RxTools y PEGASUS. El primero estará al cargo de la obtención de los archivos de señal EGNOS, mientras que el segundo usará la información proveniente de RxTools para analizar la señal SBAS y obtener sus prestaciones. Como complemento, RxTools también se utilizará en esta parte, proporcionando información adicional sobre la operación y la señal.

8.1 RxTools

El programa RxTools es un conjunto de herramientas GUI, diseñadas por Septentrio, para monitorizar y configurar la operación de sus receptores, así como la toma de datos desde ordenador o la descarga de información almacenada en el equipo [48]. Permite procesar los datos obtenidos, y convertirlos en otros formatos de interés, como KML o RINEX.

Para el almacenamiento de información, el receptor emplea el Formato Binario Septentrio (SBF), que organiza la información en bloques SBF de manera compacta y eficiente. Permite transmitir grandes cantidades de información, con gran nivel de detalle, mediante conexión serie de poco ancho de banda.

La lista de programas incluidos en RxTool es la siguiente:

- *RxLauncher*: Es la aplicación de inicio general, que permite ejecutar el resto de aplicaciones disponibles mediante un clic.
- *RxControl*: Esta GUI facilita el control y la monitorización del receptor en tiempo real. Permite numerosas opciones de toma de datos y configuración del receptor, además de vigilar el estado de la señal, en tiempo real. Ejemplos son la configuración del receptor, los bloques de información que recoger, el manejo del disco duro del receptor, o la selección de las constelaciones a emplear.
- *Data Link*: Esta sencilla interfaz permite el intercambio de información entre diferentes dispositivos, mediante la conexión entre los mismos.
- *SBF Converter*: El uso de esta GUI permite al usuario introducir los datos en formato SBF obtenidos del receptor, y convertirlos en otro formato, como RINEX, KML o ASCII.
- *SBF Analyzer*: Si RxControl permite estudiar la señal y la ejecución del proceso de recepción en tiempo real, *SBF Analyzer* se encarga de la misma función en el postproceso, permitiendo estudiar parámetros como la visibilidad de la constelación, los errores ionosféricos o la relación portadora a ruido.
- *RxLogger*: Facilita la captura de datos SBF desde el receptor, además de poder definir su posterior tratado. Pueden escogerse diferentes corrientes (*streams*) de datos, grabando cada una información a una frecuencia diferente.

- *RxUpgrade*: Esta pequeña aplicación permite actualizar el software del receptor, en base a las actualizaciones disponibles. Puede actualizar uno o varios archivos a la vez.
- *RxDownload*: Aplicación al mando del control de la información almacenada en el receptor. Puede conectarse con varios receptores a la vez, establecer la configuración de cada dispositivo, y emitir datos a los receptores.
- *RxPlanner*: Es un programa de Planificación de Misiones Satélite. Estableciendo el período de análisis y la posición del usuario, la GUI se encarga de obtener y mostrar la visibilidad de los Sv, y el DOP.
- *RxAssistant*: El último programa es una interfaz que hace muy sencilla la configuración de un receptor y su monitorización, además de proveer datos básicos sobre el estatus del sistema, y salidas en diferentes formatos.

De todos los programas mostrados, los que resultan de mayor utilidad son *RxControl*, *SBF Converter* y *SBF Analyzer*. El primero permite realizar una configuración del receptor con gran nivel de detalle, obteniendo archivos que luego convertir con *SBF Converter* y procesar con *SBF Analyzer*. Su funcionamiento será ilustrado en el siguiente capítulo, cuando se explique su papel en el proceso de validación.

8.2 PEGASUS

PEGASUS es el nombre que recibe el software encargado de postprocesar la señal GNSS recibida, obteniendo las prestaciones de la señal. Desarrollado por EUROCONTROL con fines de validación e investigación sin ánimo de lucro, este programa permite automatizar el proceso de análisis de datos GNSS, aplicando capas de personalización, facilitando la combinación y almacenamiento de los datos para su procesado [49].

De los datos proporcionados, es posible determinar las prestaciones mencionadas, errores de trayectoria o simulaciones de algoritmos de posicionamiento. El programa cuenta con escenarios de simulación programados, y consta de diversos módulos para realizar todas sus funciones. En el proyecto actual, se utilizan tres módulos de este conjunto:

- *Convertor*: Primer módulo en emplearse en la fase de postproceso. Su objetivo es el de convertir los archivos de navegación, de diferentes formatos, en un formato único y estándar, comprensible por el programa.

Acepta archivos SBF provenientes de los receptores Septentrio, facilitando en gran medida la conversión de la información.

- *GNSS Solution*: Los resultados obtenidos en el primer módulo se emplean en el segundo, mediante su procesado y la creación de una solución dependiendo del sistema a evaluar (GPS, SBAS, GBAS). La salida de este módulo será un archivo *sol*, con la información necesaria para graficar los resultados.
- *MFile Runner*: Empleando programas escritos en MATLAB, este módulo permite visualizar los resultados obtenidos en la fase anterior. Las funciones de interés que incluye este módulo son el análisis SBAS (general, errores horizontal y vertical, niveles de protección, diagrama de Stanford), y los análisis independientes de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

El uso específico del programa se reserva para el siguiente capítulo.

Capítulo 9

Ejecución del proceso de validación

Habiendo sido introducido todo el marco teórico que forma la base de este proyecto, es momento de mostrar el proceso seguido hasta la realización del ensayo de vuelo. El capítulo que se incluye a continuación detalla todos los pasos seguidos durante el proceso, desde el análisis de la misión a realizar y la configuración del receptor, hasta el montaje final de la aeronave y el correspondiente vuelo. Durante esta etapa, se han afrontado diversos retos que serán expuestos junto a su solución, siendo unos de los más importantes la elección de la aeronave, y su consecuente modificación para albergar el módulo de recepción de señal.

Al acabar el capítulo, se dará paso al análisis de los datos obtenidos y la extracción de conclusiones, con las que finalizará el proyecto.

9.1 Análisis de la misión

El primer paso de todo el proceso de validación consiste en la determinación de las características de la misión a realizar. Como se ha indicado a lo largo de todo el proyecto, el objetivo a largo plazo sería la validación de una aproximación LPV-200, empleando el servicio *Safety of Life* del sistema EGNOS. Por ello, resulta lógico plantear una operación de aproximación en aeródromo, ejecutada por el sistema RPAS escogido.

Teniendo en cuenta la normativa sobre aeronaves no tripuladas expuesta en la Sección 7.2, el vuelo realizado se enmarca en el contexto de vuelo recreativo. Se asumirá vuelo en condiciones VLOS, limitado a una distancia de 500 metros y una altura máxima de 120 metros y, más tarde, se confirmarán estas limitaciones mediante el servicio de ENAIRE dedicado a estos sistemas.

La operación se ubica en el Club de Radiocontrol Chiva La Peñeta, localizado en la comarca de Chiva, población de Foiós. La Tabla 9.1 recoge las características principales del mismo:

Latitud	39° 29' 25.48" N
Longitud	0° 42' 59.98" O
Elevación (m)	270
Orientación de la pista	10 - 28
Dimensiones de la pista (m)	80 x 11
Viento predominante	Este (Levante) y Oeste (Poniente)

Tabla 9.1: Características del Club RC Chiva La Peñeta

Siguiendo las limitaciones de distancia y altura expuestas antes, se diseña una aproximación común con pendiente de 3°, delimitando su alcance hasta 500 metros desde el centro de la pista, e incluyendo un circuito de vuelo visual con el que poder realizar la aproximación y retomar el vuelo, permitiendo tomar varias muestras de señal con el mismo procedimiento. Para su diseño, se han de tener en cuenta el resto de aeronaves presentes en las cercanías del aeródromo, los obstáculos de altura considerable cercanos al club (como naranjos o cercados), y la prohibición de sobrevolar el lado sur de la pista. Tomando la orientación 28 de la pista para realizar la aproximación, al presentar menor número de obstáculos, ésta se muestra en la Figura 9.1:



Figura 9.1: Aproximación al aeroclub de Chiva

La misma ha sido realizada mediante el software MATLAB, de manera que todo el recorrido pueda generarse independientemente del aeródromo de vuelo, la longitud de la aproximación o la orientación de la pista, permitiendo modificar fácilmente la disposición de la operación. Visto el procedimiento y sus características, debe elegirse el tipo de aeronave a utilizar. Dicha aeronave debe tener la autonomía y potencia capaces de elevarla hasta el inicio de la aproximación y sobrevolarla durante varias ocasiones, pudiendo regresar al centro de pista en caso de fallo, manteniendo la seguridad de la operación en todo momento. Se presentan dos alternativas: un RPAS de ala fija, propiedad de la UPV, y un octacóptero, operado por la empresa EtecDrones, autorizada por el fabricante chino DJI. Las ventajas de cada modelo son expuestas en los párrafos siguientes:

- El modelo de la UPV es un RPAS de ala fija, similar a una aeronave común de tamaño reducido. Entre sus ventajas, se encuentran su completa disponibilidad (al pertenecer a la UPV), el acceso total a sus componentes (permitiendo realizar cualquier modificación requerida), y su similitud con una aeronave de ala fija (dotando de mayor realismo a la operación).
- El RPAS ofrecido por EtecDrones es un modelo octacóptero de alta gama. Como ventajas principales, el modelo permite cargar hasta 8 kilogramos adicionales, presenta mayor estabilidad al tratarse de un multirrotor, y su autonomía es mayor (al portar dos baterías de gran capacidad). La navegación asistida mediante GPS es un factor a tener muy en cuenta, característica que posee este modelo.

La opción ideal consistía en el uso de la aeronave proporcionada por la Universidad, siendo más favorables en temas de disponibilidad y personalización. Sin

embargo, el proceso de puesta a punto, revisión y mantenimiento del RPAS suponía una carga de trabajo muy elevada, digna de merecer un Trabajo Fin de Grado propio, al ser necesaria la sustitución del tren de aterrizaje, los servomotores, los alerones, la configuración del enlace de radio o la instalación del motor, entre otras tareas. Es por ello, que la opción escogida resultase ser el octacóptero prestado por la compañía asociada a DJI. Las especificaciones del modelo pueden verse en la Figura 9.2:

AERONAVE	
Modelo	Wind-8
Dimensiones (extendido)	1471mm x 1471mm x 482mm
Dimensiones (plegado)	780mm x 780mm x 482mm
Forma de plegarse	Sombrilla
Distancia diagonal entre ejes	1520mm
Número de baterías	1
Peso	11.9kg
Peso máx. al despegue	20kg
Carga máxima	8.1kg
Precisión de vuelo	±0.5m (Vertical) ±1.5m (Horizontal)
Velocidad angular máx.	300°/S (Inclinación) 150°/S (Giro)
Ángulo de inclinación máx.	35°
Velocidad máx. en ascenso	5m/s
Velocidad máx. en descenso	4m/s
Velocidad máx.	15m/s
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	5000m
Resistencia al viento máx.	12m/s
Tiempo máx. de vuelo	38.5min (DZ12000*2)
Modelo de motor	DJI6010
Modelo de Hélice	R2170
Tren de aterrizaje	Ajustable
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 40°C
Nivel IP	IP43

Figura 9.2: Especificaciones del modelo Wind-8

La gran capacidad que poseen sus baterías (12000 miliamperios por hora), además de poder montar dos de ellas, sumada a su potencia, estabilidad y resistencia estructural, lo convierten en un modelo ideal para la realización del ensayo en vuelo. Asimismo, como se mostrará posteriormente, su disposición y montaje permiten la colocación de los elementos receptores de señal GNSS necesarios para la toma de datos.

Conociendo los parámetros de la aeronave, es posible retomar las limitaciones de la operación, comprobando su validez. ENAIRE ofrece un método rápido de verificación, disponible en su página web, mediante el cual se pueden obtener las normas de operación de un RPAS (dependientes de la operación, el peso o las

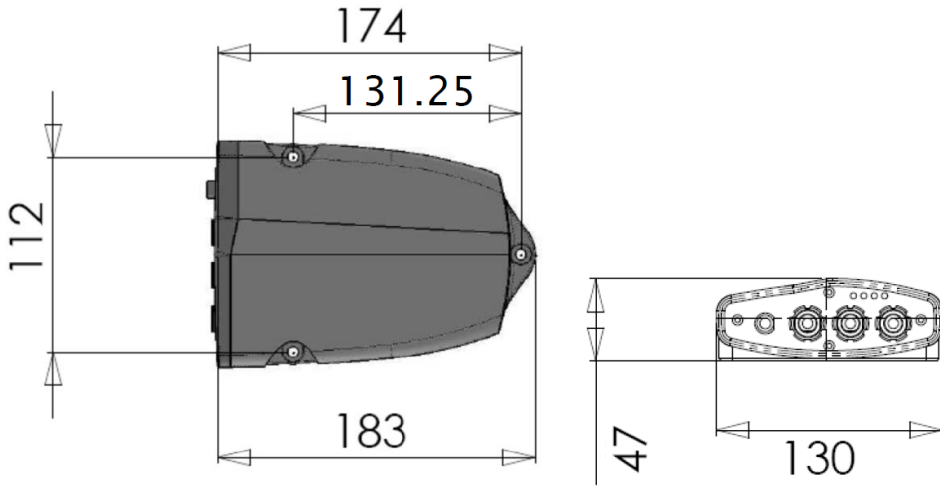
condiciones visuales), respondiendo un sencillo cuestionario [50]. Introduciendo las condiciones del vuelo (recreativo, VLOS, sin vídeo o fotografía, peso entre 2 y 150 kilogramos, diurno, y evitando sobrevolar edificaciones o personas), la página web devuelve las limitaciones esperadas.

Además de aquellas relacionadas con la zona de vuelo (evitar espacio aéreo controlado, zonas reservadas o restringidas, cercanías de aeródromos y aeropuertos), se detallan las limitaciones de aplicación general: establecimiento de una zona de seguridad, distancia máxima de 500 metros, altura no superior a 120 metros, y vuelo diurno en condiciones de visibilidad. En adición, el vuelo se realiza en un aeroclub federado, y es pilotado por un piloto federado en un espacio aéreo de ocio y deporte, sin constituir una exhibición o una demostración. Para finalizar, la aeronave no supera los 25 kilogramos de masa, ni los 3 metros de envergadura.

9.2 Equipo receptor

La aeronave destinada a la realización de la operación, debe ser capaz de transportar el equipo receptor de señal GPS y EGNOS, de manera que se puedan obtener datos de la aproximación realizada. El conjunto de medida empleado se compone de tres elementos principales.

El **módulo de recepción AsteRx2e HDC**, de la marca Septentrio, es el receptor de señal GPS utilizado en este proyecto. Configurado mediante Rx-Tools, permite procesar las señales GNSS de diferentes constelaciones (GPS, GLONASS, EGNOS) y procesarlas, almacenando la información en un disco duro de 2 *gigabytes*, en formato SBF, que luego puede volcarse en cualquier ordenador mediante conexión USB. Cuenta con indicadores LED para conocer su estado de alimentación, el número de satélites visibles, la frecuencia de actualización y el estado de la solución de la posición. Requiere de alimentación mínima de 9 voltios, pudiendo trabajar hasta con 30 voltios, con un consumo de 3.1 vatios. Las dimensiones del aparato son las mostradas en la Figura 9.3:



All dimensions expressed in millimeters.

Mounting holes: hole diameter: 6mm.
 max diameter of screw head: 11mm.

Figura 9.3: Dimensiones del receptor AsteRx2e HDC [51]

La recepción de las señales se realiza mediante la **antena PolaNt** de Septentrio, destacable por su peso ligero, alta precisión, gran ganancia e incorporación de amplificadores de bajo ruido, así como su diseño resistente a golpes y agua. Permite recibir señales GPS, GLONASS y EGNOS mediante alimentación de entre 3 y 15 voltios, y sus dimensiones se se incluyen en la Figura 9.4:

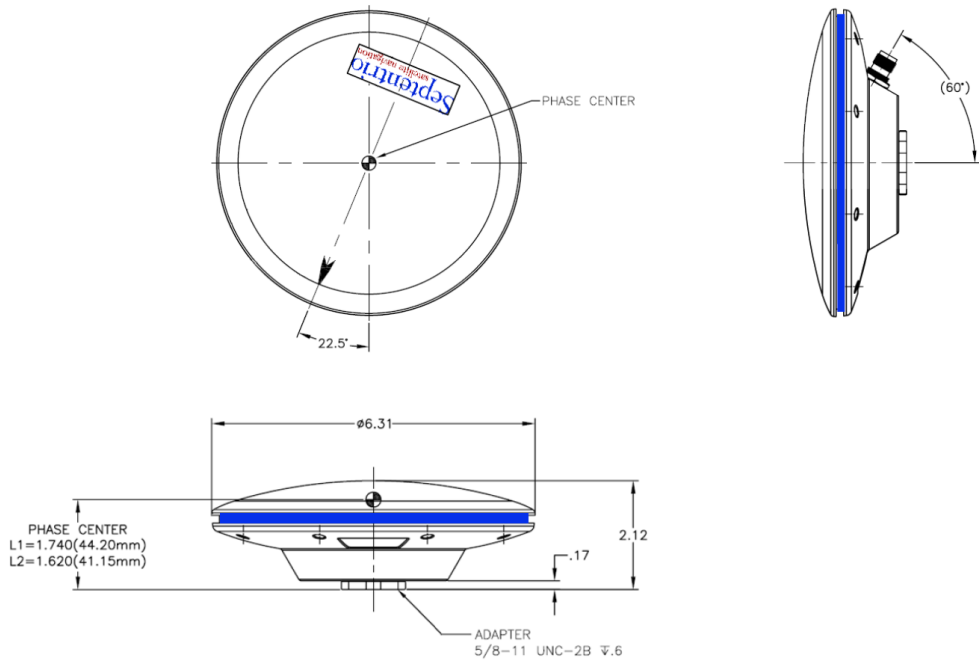


Figura 9.4: Dimensiones de la antena PolaNt [52]

Para alimentar ambos equipos, se ha optado por el empleo de una **batería de polímero de litio** (comúnmente abreviada batería LiPo), similar a las baterías de ión litio convencionales, sustituyendo el electrolito líquido de las últimas por un gel polímero, que permite obtener mayor energía específica (energía por unidad de masa) con menor peso, siendo especialmente aptas para aplicaciones como portátiles, móviles o en aeromodelismo. La batería escogida para el proyecto cuenta con una capacidad de 5000 miliamperios por hora y 3 celdas (3S), proporcionando 11.7 voltios al sistema. Se cumplen así los mínimos de alimentación necesarios, a la par que se asegura la autonomía del receptor durante el vuelo. Como inconveniente, requieren de cuidados especiales y cargadores específicos que mantengan la carga y el voltaje de manera equilibrada (balanceada) en cada celda.

9.3 Pesos equivalentes

La distribución de masas de una aeronave resulta fundamental en vuelo, determinando la maniobrabilidad de la aeronave y limitando ciertas maniobras. La instalación de material adicional en un RPAS requiere de un equilibrado previo, asegurando que los elementos externos no alteran el equilibrio de la aeronave.

Para asegurar la integridad física del equipo receptor, se disponía de un modelo en madera de la antena y el módulo de recepción, taladrados siguiendo el patrón de los originales, para permitir la misma sujeción. Como complemento, se han repasado y lijado los bordes y las superficies de las piezas, mejorando el acabado y evitando peligros derivados del contacto con astillas y bordes. La Tabla 9.2 muestra las masas del equipo original, junto con las de sus equivalentes en madera:

Elemento	Masa real (g)	Masa equivalente (g)
Módulo receptor AsteRx2e HDC	534	558
Antena PolaNt	389	402
Batería LiPo 3S	360	368

Tabla 9.2: Masas de los diferentes elementos y de sus pesos equivalentes

9.4 Configuración del módulo de recepción

El receptor utilizado permite albergar una gran variedad de configuraciones en memoria, pudiendo elegir entre diferentes parámetros para la personalización de la señal recibida: constelaciones y satélites a emplear, frecuencia de medida, correcciones, estadísticas RAIM...

A continuación, se expone el proceso seguido para la configuración del receptor empleada durante la toma de medidas. La misma está orientada al proceso posterior de la señal SBAS procedente de EGNOS, y a diversos parámetros que se analizarán mediante el programa SBF *Analyzer*. La configuración al completo corre a cargo del programa RxControl, cuya interfaz puede observarse en la Figura 9.5:

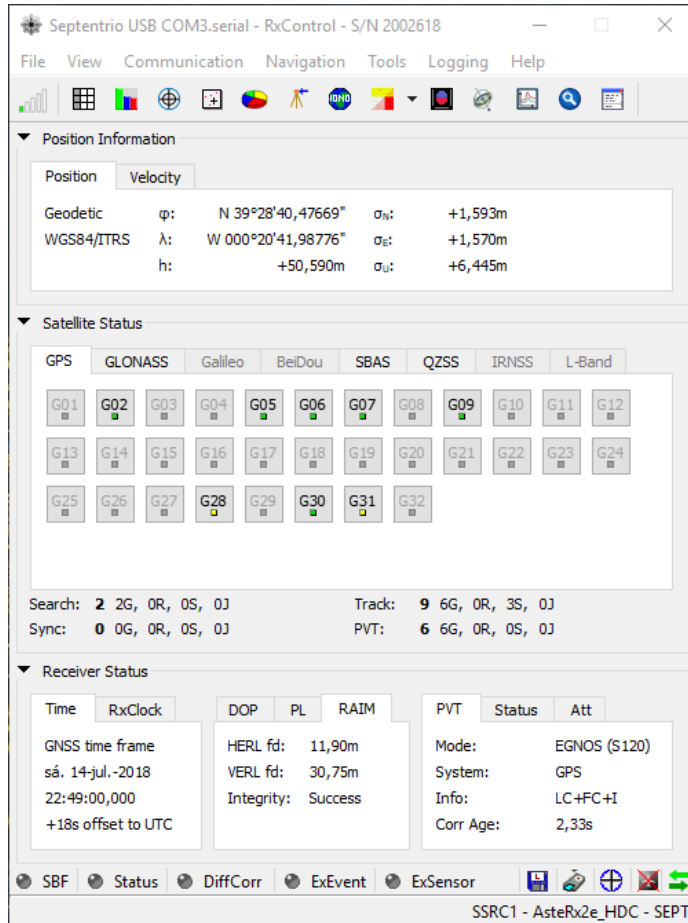


Figura 9.5: Interfaz GUI de RxControl

En la parte superior, se encuentran los menús desde los que partirá la explicación del proceso de configuración. Justo debajo, la sección *Position Information* muestra los datos en tiempo real (si existe conexión con el receptor) de posición y altitud, junto con sus desviaciones. La sección *Satellite Status* está enfocada al estado de las constelaciones; navegando entre las pestañas, es posible determinar los satélites de las diferentes constelaciones que se encuentran visibles, así como cuántos satélites se están siguiendo, y cuántos se emplean para la solución de la posición. Finalmente, los datos referentes a tiempo GNSS, DOP o PVT se hallan en la última franja de la interfaz, denominada *Receiver Status*.

Los menús a emplear para la correcta configuración del receptor son los siguientes:

- *File*: Dentro de la pestaña *File*, la conexión USB con el dispositivo se activa mediante el submenú *Change Connection*. Con *Copy Configuration* es posible trabajar con las configuraciones almacenadas en el receptor: el mismo tiene una configuración a utilizar al encenderse (*Boot*), y dos configuraciones adicionales de reserva. Al temrinar de configurar el programa, deberá copiarse la configuración actual (*Current*) en la configuración de inicio del módulo.
- *Communication*: La pestaña *Communication* permite configurar los bloques SBF que el receptor grabará durante la sesión. También permite la creación de *streams*, con los que almacenar conjuntos de datos con diferentes frecuencias. Para la operación y proceso posteriores, se marcan las casillas correspondientes al formato RINEX, además de aquellas relativas al almanaque de las constelaciones y toda la información referente a las constelaciones de satélites GEO. También se seleccionan los datos de estado del receptor, RAIM y señal.
- *Navigation*: En este menú, se eligen las constelaciones y señales a emplear para el posicionamiento y seguimiento. Deben elegirse, tanto en los submenús *Tracking* como PVT, la constelación GPS y los satélites EG-NOS, junto con sus correspondientes frecuencias. Todos los elementos son fácilmente identificables mediante etiquetas.
- *Logging*: Finalmente, la pestaña *Logging* no se emplea en la configuración del receptor, pero es necesaria para descargar los datos del receptor en formato SBF, a través de la opción *Download Internal Disk*.

El proceso de configuración ha requerido de diversas pruebas de campo, con las que validar las opciones escogidas. El uso del receptor en diversos entornos y condiciones meteorológicas (ciudad, campo, cielo despejado, noche) ha servido para determinar la configuración óptima, a la par que para asegurar el correcto funcionamiento del sistema con anterioridad al vuelo. Los indicadores LED disponibles en el módulo de recepción, y la interfaz en tiempo real de RxControl, han posibilitado la monitorización de los parámetros de estudio durante los ensayos, procediendo del mismo modo en el ensayo de vuelo, previo al despegue de la aeronave.

9.5 Montaje del equipo receptor en la aeronave

El equipo proporcionado por EtecDrones es un dron de gama profesional, pensado para tareas de fotografía y agricultura de precisión. La instalación del equipo de recepción ha conllevado diversas tareas y, en particular, varios retos que solucionar para la correcta equipación del receptor a bordo del RPAS.

Para el ajuste de los elementos de recepción en la aeronave, se ha hecho uso de uno de los dos espacios para baterías del RPAS, y de una plataforma ubicada en el lateral del multirroto. Se exponen las modificaciones realizadas al sistema receptor y al dron, que han permitido su correcta instalación.

El **circuito** utilizado para conectar la batería al módulo de recepción presentaba deficiencias en su soldadura, y partes del mismo se encontraban al aire, siendo por tanto potenciales peligros en vuelo. La solución de este problema consistió en la soldadura de las partes afectadas, y el empleo de conectores estándar XT-90 para mejorar la conexión. Por otra parte, el uso de una batería de polímero de litio exige el uso de un cargador balanceado, con el que equilibrar la carga.

La batería ha sido instalada, junto con el cableado asociado, en la parte inferior del dron, aprovechando las hendiduras del espacio para baterías, a través de varias bridas, consiguiendo una fijación completa que evite cualquier movimiento por parte del cableado o la propia batería.

En este mismo hueco, se ha situado el **módulo de recepción**. Utilizando varias bridas y las perforaciones destinadas a su atornillado, se ha conseguido colocarla de manera estable y fija, evitando, como en el caso anterior, cualquier movimiento por su parte durante la operación. La localización es óptima, al permitir la refrigeración del mismo durante el vuelo.

El mayor reto lo ha supuesto la instalación de la **antena receptora**, al presentar un diámetro considerable, y poder apantallar la señal del GPS del propio RPAS. Este hecho ha evitado su colocación en la parte superior de la aeronave, debido realizarse ésta en la plataforma lateral mencionada antes.

Para la colocación, se ha hecho uso de una placa de fibra de carbono, de la que se ha extraído una pieza de 15 centímetros de largo y 10 centímetros de ancho. Aplicando conocimientos de fabricación aeroespacial y, a través de herramientas acordes con la resistencia y dureza de este material, ha sido posible trabajar la placa, realizando los cortes y perforaciones necesarias para atornillarla a la plataforma y asegurarla correctamente.

Al obtener la placa, se ha empleado resina de fraguado rápido y fijador de tornillos para aumentar la seguridad del montaje, permitiendo inmovilizar la antena en su posición. El cable de señal que conecta la antena con el receptor es colocado entonces en la parte baja de la aeronave, asegurando que ningún elemento entra en contacto con las hélices del multirroto o se desplace durante la aproximación.

9.6 Pruebas de interferencia y apantallamiento

Habiendo montado el equipo GPS, el paso previo al ensayo de vuelo consiste en la comprobación de interferencias y apantallamientos que puedan producirse. La antena receptora del sistema cuenta con apantallamiento en su parte inferior, y su presencia podría afectar a la recepción de la señal GPS por parte del RPAS. Igualmente, el propio módulo de recepción y los cables adicionales podrían afectar al enlace de radio, al navegador de la aeronave o al magnetómetro, por los campos magnéticos generados debido a la presencia de corrientes eléctricas.

Procediendo con la colocación del aparato en el helipuerto disponible en las instalaciones de EtecDrones, se hizo uso del software DJI GO, programa específico de Apple para la monitorización de los parámetros de vuelo de los RPAS de DJI. Tras un análisis del sistema, no se permitieron interferencias anómalas ni comportamientos extraños en el posicionamiento o el magnetómetro, con lo que la aplicación autorizó el despegue del equipo.

En ausencia de apantallamiento e interferencia del receptor de Septentrio, restaba comprobar el Índice K Planetario (K_p), cuya finalidad es la de caracterizar las discrepancias en el campo magnético terrestre. Proporcionado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA), se considera la no presencia de alteraciones relevantes cuando el índice K_p es menor a 4, e inaceptable para el vuelo cuando se supera este valor. Como muestra la Figura 9.6, los valores de este índice en el día del vuelo (16 de julio de 2018) no superan la cifra umbral, siendo seguro el vuelo de la aproximación:

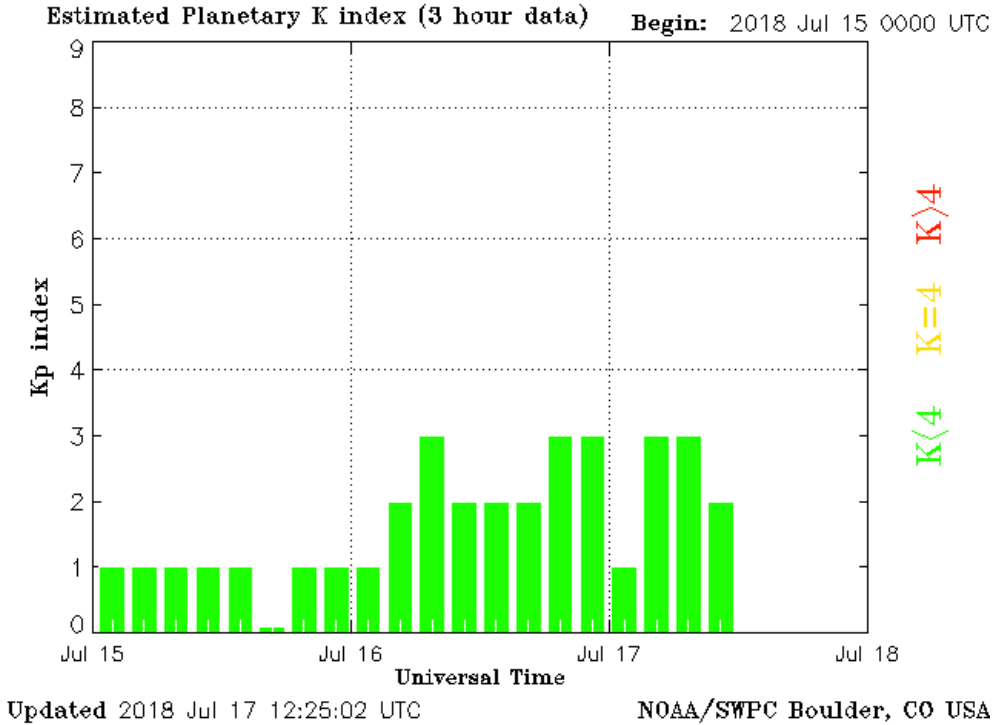


Figura 9.6: Índice K_p [53]

9.7 Ensayo de vuelo

Tras las comprobaciones operacionales oportunas y la correcta instalación del módulo, el dron fue transportado hasta el Club RC Chiva La Peñeta para proceder con el ensayo de vuelo. Una vez en el centro de la pista, se desplegó y se instalaron las baterías. Procediendo con la comprobación del enlace de radio y la señal GPS, ambos permitían el vuelo del RPAS. Una vez se conectó el equipo receptor de GPS, la Figura 9.7 muestra la aeronave, completamente equipada, lista para despegar:



Figura 9.7: RPAS en pista, listo para despegar

Una vez en el aire, se comenzó la operación realizando un vuelo de prueba, para confirmar el estado del dron, sus prestaciones y el control y manejo. Después de aterrizarlo y reiniciar el equipo Septentrio, se procedió con el vuelo de la aproximación, en modo manual al no disponer el modelo de controladora de vuelo. El circuito volado permitió a la aeronave desplazarse alrededor de la pista para coger altura, y descender la senda de planeo de 3° en modo visual. El ensayo se dio por concluido tras varias repeticiones de la maniobra, y los datos fueron extraídos del módulo de recepción para su procesado.

9.8 Post-procesado

El último paso, necesario para validación del procedimiento, es el procesado de los datos obtenidos, en aras de obtener los valores de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad asociados al vuelo.

Tras el volcado del fichero SBF con los datos, se emplea la herramienta *SBF Converter* para obtener el fichero KML del vuelo, con el objetivo de compararlo con la aproximación diseñada. La visualización del archivo se realizará mediante Google Earth. Para la obtención de las prestaciones, es momento de utilizar PEGASUS como herramienta de post-proceso, y los módulos que lo componen.

El módulo *Convertor* permite convertir el fichero SBF en uno en formato ASCII, apto para el trabajo con PEGASUS. En la opciones del menú, deben modificarse varios parámetros. En la sección *Data Properties*, en el tipo de receptor, debe escogerse la categoría Septentrio. El modo de corrección queda por defecto como SBAS MODE 0. La opción *Leap Seconds* debe establecerse de manera que estos segundos de corrección se obtengan de los datos introducidos en el programa, y no sean introducidos por el usuario. Al aplicar los cambios, se pulsa el botón *Start* y el programa comenzará la conversión del archivo, generando múltiples ficheros. La interfaz del módulo puede observarse en la Figura ??:

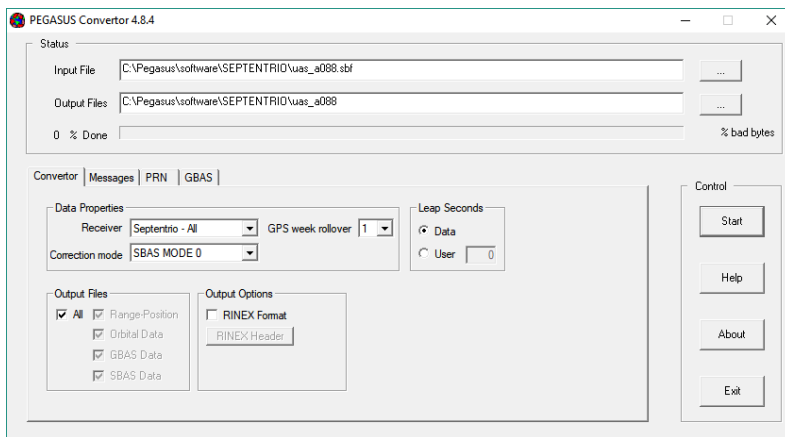


Figura 9.8: Interfaz del módulo *Convertor*

El siguiente módulo a utilizar es el módulo *GNSS Solution*, empleado para calcular las prestaciones de la señal, que serán visualizadas más tarde por medio del tercer módulo. En el menú que se despliega, la sección *General Options* debe configurarse, de manera que la opción SBAS sea la escogida. En el desplegable inmediatamente inferior, se debe escoger la opción EGNOS:120 (AOR-E), correspondiente al satélite PRN 120 que proporciona cobertura en la Región Este del Océano Atlántico. A la derecha del menú, la estación de referencia debe ser la posición del punto de referencia del aeroclub (en este caso, las coordenadas proporcionadas por el propio club). Finalmente, en la pestaña *Advanced*, debe comprobarse que la opción *Ignore Almanac* no está activada, puesto que la señal dispone del almanaque de la constelación GNSS. Adicionalmente, puede desactivarse o activarse la opción *Smoothing*, dependiendo de si se prefiere emplear o no métodos para acelerar la convergencia de la solución. En esta

ocasión, se ha preferido obviar esta opción. La Figura 9.9 muestra la interfaz de este programa:

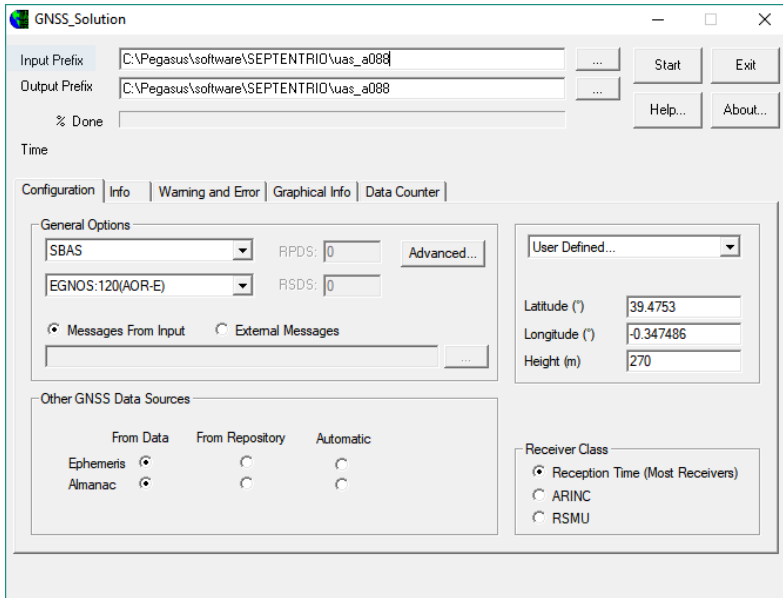


Figura 9.9: Interfaz del módulo GNSS *Solution*

El tercer módulo, denominado *MFile Runner*, se dedica a la representación de los resultados obtenidos en el apartado previo. La pestaña *Options* permite escoger las funciones y los archivos que se ejecutarán en la pestaña *Log*. Los apartados de interés son aquellos relacionados con el estudio de los sistemas SBAS: de todos, destaca *Analyze SBAS*, la función más general de todas las presentes en el programa en cuanto a tratamiento de datos de señal EGNOS. Al ejecutarlo, crea un archivo con extensión *.xml* con gran cantidad de datos, entre los que se encuentran errores estadísticos, niveles de porteción, histogramas y diagramas de Stanford para la determinación de la integridad. Su interfaz principal es la mostrada en la Figura 9.10:

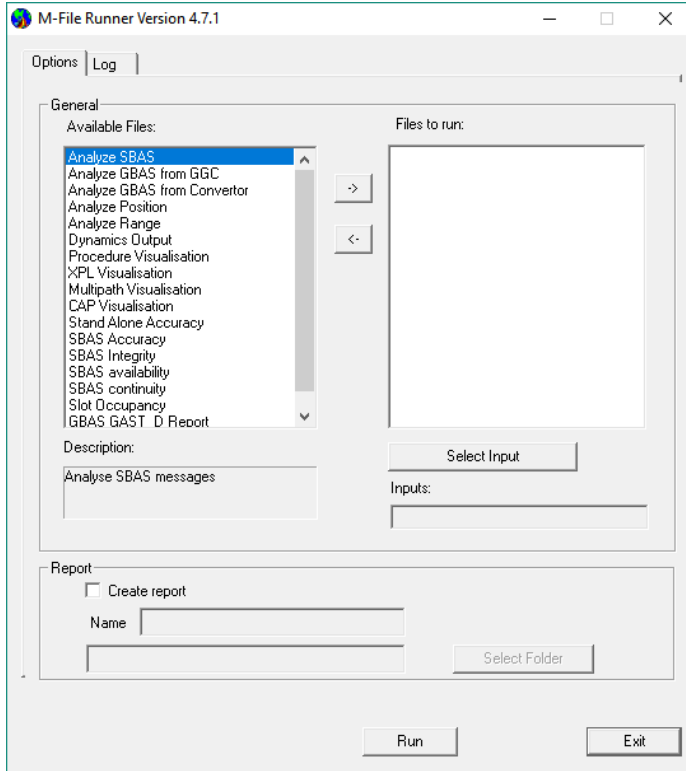


Figura 9.10: Interfaz del módulo GNSS *Solution*

Los diferentes datos, obtenidos en las pruebas de campo previas al vuelo del RPAS, han sido analizados con PEGASUS con el objetivo de facilitar un método de práctica, que permitiera la familiarización con el programa y sus funciones. El punto actual del proyecto, posterior a la obtención y tratamiento de los datos reales de vuelo, es el momento en el que mostrar los resultados obtenidos y proceder con las conclusiones.

Capítulo 10

Resultados

Las fases del proceso de validación, encargadas de determinar y llevar a cabo la misión, la elección del tipo de aeronave, el montaje, el vuelo final del sistema y el procesado de los datos, dan paso a la muestra de los resultados obtenidos. Del análisis de los mismos, se extraerá la información necesaria con la que determinar si, como se pretendía, el procedimiento de aproximación LPV-200 es validado.

A continuación, se expondrán los resultados logrados en materia de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, y los mismos serán comparados con los requisitos establecidos por el servicio *Safety of Life* de EGNOS; si todos ellos se cumplen, el procedimiento quedará validado. También se comparará la aproximación volada con la aproximación diseñada en MATLAB, viendo las diferencias entre el caso ideal y el caso real.

10.1 Aproximación realizada

El vuelo del RPAS equipado con el equipo Septentrio ha permitido no solo el procesado de la información GNSS para establecer las prestaciones del sistema, sino también ha posibilitado la grabación de la ruta seguida. Mediante *SBF Converter*, el archivo SBF ha sido convertido a un archivo KML, para visualizarlo en Google Earth. El resultado es el mostrado en la Figura 10.1, donde la traza del dron se muestra en color turquesa:

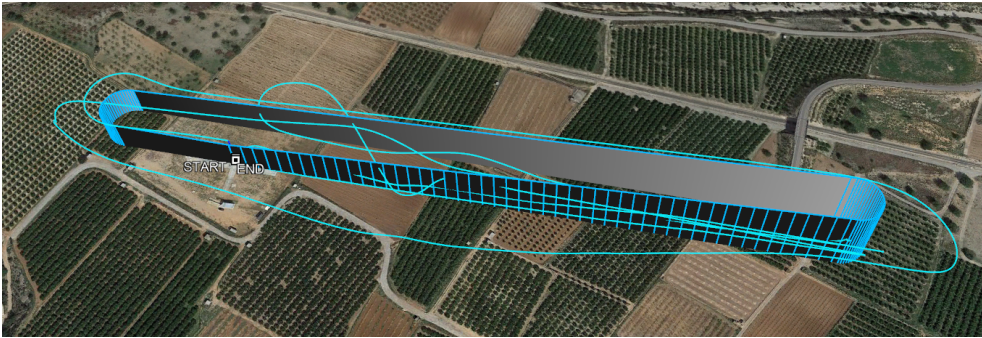


Figura 10.1: Comparación entre la ruta planificada y la ruta volada

el vuelo mostrado comprende el inicio del vuelo, y todas las aproximaciones realizadas, siendo las primeras de prueba, para comprobar la pericia del piloto y ver el comportamiento del RPAS en la senda de descenso. Segmentando el archivo KML en cuestión, se puede acceder a partes concretas de la aproximación para hacer un análisis más preciso. Centrando la comparación en la última aproximación realizada, se obtiene la Figura 10.2:

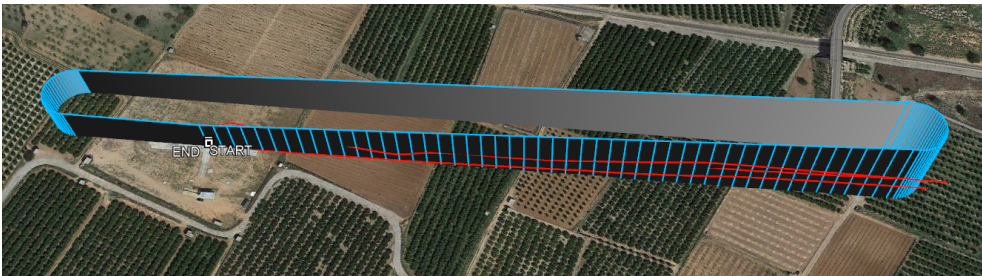


Figura 10.2: Comparación entre la ruta planificada y la última aproximación

Recordando que la aproximación ha sido volada en visual, sin ayuda de piloto automático, destaca la diferencia de alturas entre ambos procedimientos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el Error Vertical de Posición que, como se verá en la Sección 10.2, tiene un valor medio de 3.24 metros, siendo en el 95 % de los casos menor a 3.79 metros; el error en cuestión justifica la diferencia de altura.

Analizando el plano 2D, por otra parte, se ve como la alineación con el eje de la aproximación es excelente. Al igual que con el posicionamiento vertical, existe un error horizontal a tener en cuenta, con lo que esta alineación podría no ser tan acertada. No obstante, se cuenta con referencias visuales en el terreno que facilitan esta labor, al contrario que con el posicionamiento vertical, de mayor complejidad.

10.2 Precisión

La medida de la precisión se realiza mediante los histogramas del Error Horizontal de Posición (HPE), y del Error Vertical de Posición (VPE). Los gráficos en cuestión se incluyen en las Figuras 10.3 y 10.4:

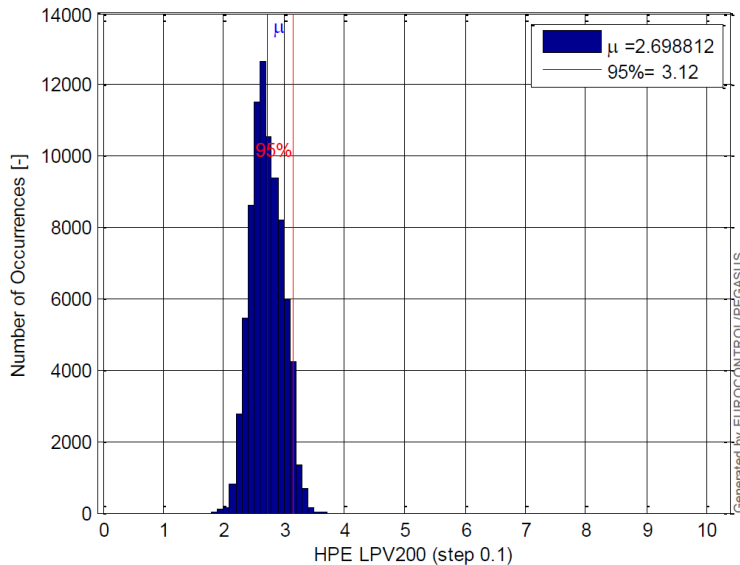


Figura 10.3: Histograma del Error Horizontal de Posición (HPE)

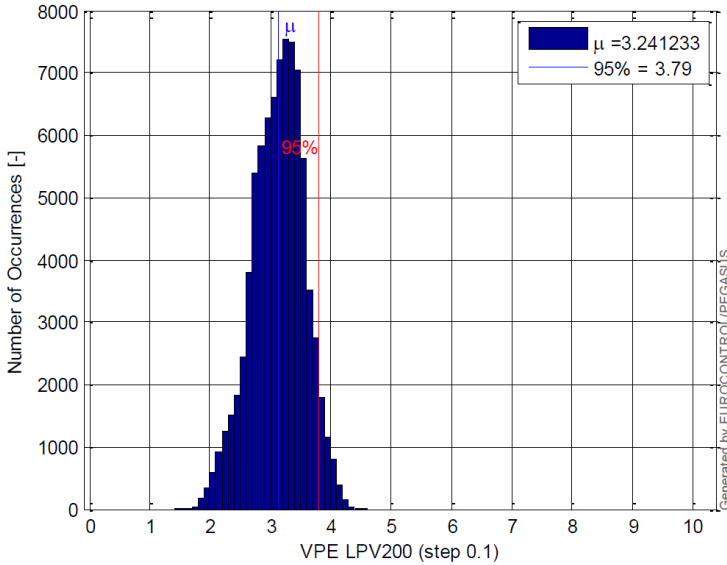


Figura 10.4: Histograma del Error Vertical de Posición (VPE)

En ambas figuras, el eje horizontal muestra el valor del error (horizontal o vertical) en metros, mientras que el eje vertical indica el número de ocurrencias de cada valor del error. En la leyenda, pueden verse los valores de la media, μ , y del percentil 95, valor que indica que el 95 % de los datos muestran un error igual o inferior a dicha cifra.

Procediendo con la comparación de los datos y los requisitos del servicio, la Tabla 10.1 aglomera la información sobre el percentil 95 de los errores:

Tipo de error	Valor obtenido (m)	Valor requerido (m)
HPE	3.12	16.0
VPE	3.79	4.0 - 6.0

Tabla 10.1: Errores HPE y VPE obtenidos y requeridos

Puesto que el percentil 95 de ambos errores es inferior a los requisitos establecidos, la precisión de la operación queda validada.

10.3 Integridad

El estudio de la integridad resulta ser el más completo, al disponer de cuatro gráficos para su análisis. Cabe recordar que se dispone de dos herramientas para esta tarea: los Índices de Seguridad, y el Diagrama de Stanford.

Comenzando con los primeros, los Índices Horizontal y Vertical de Seguridad (HSI y VSI) son los mostrados en las Figuras 10.5 y 10.6. Por otra parte, los Diagramas Horizontal y Vertical de Stanford aparecen en las Figuras 10.7 y 10.8:

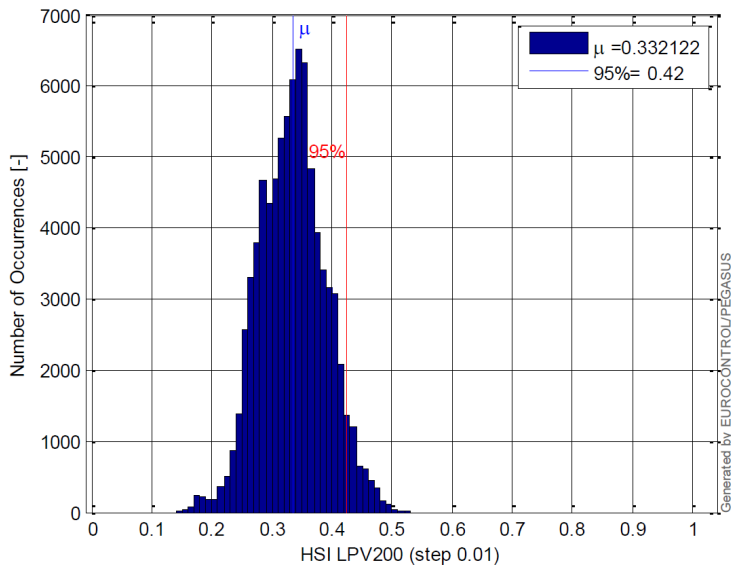


Figura 10.5: Histograma del Índice Horizontal de Seguridad (HSI)

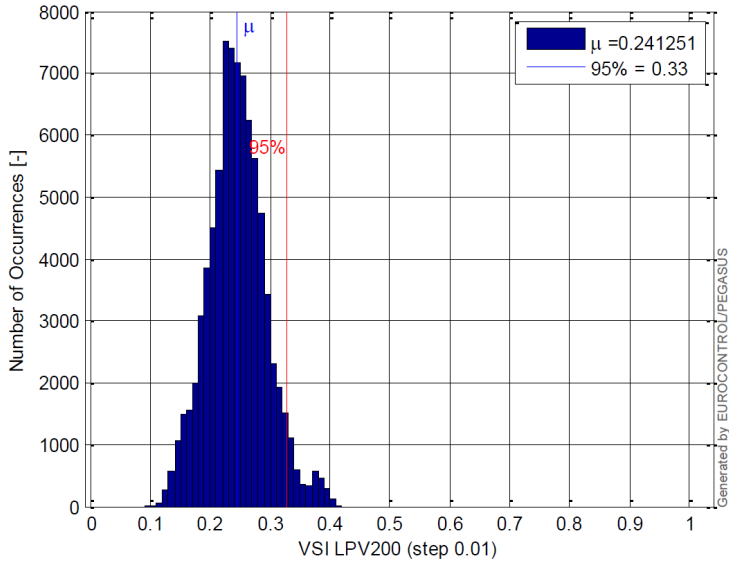


Figura 10.6: Histograma del Índice Vertical de Seguridad (VSI)

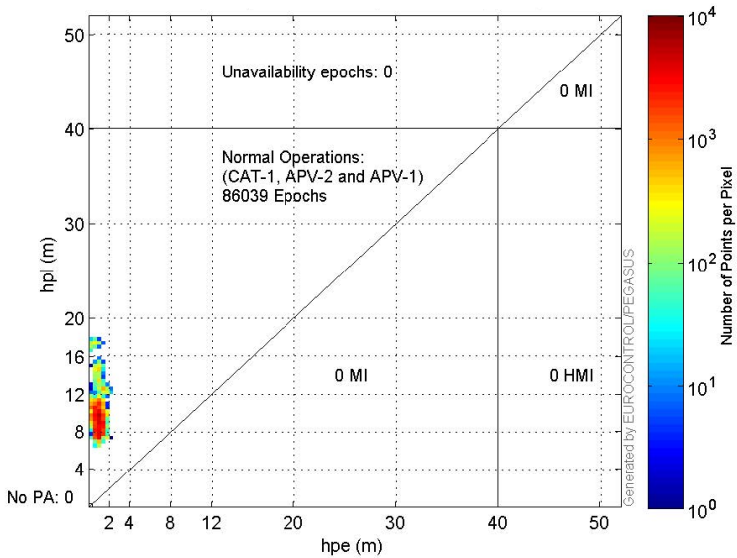


Figura 10.7: Diagrama Horizontal de Stanford

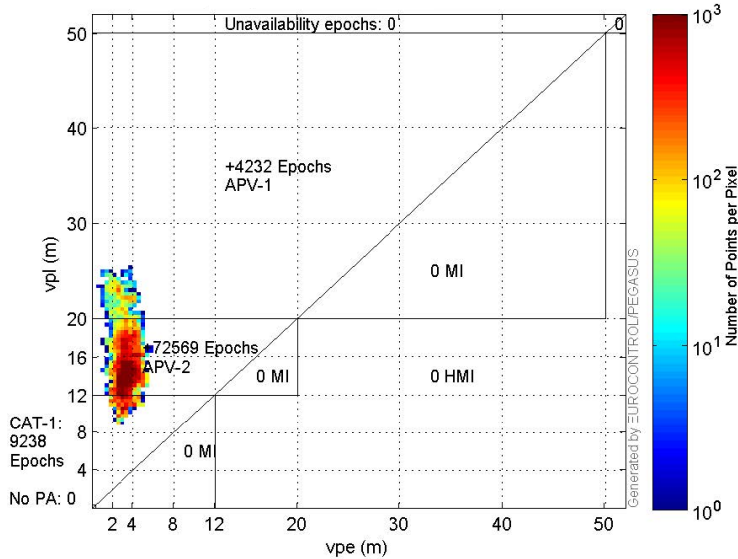


Figura 10.8: Diagrama Vertical de Stanford

Los histogramas relativos a los índices de seguridad muestran, en su eje horizontal, el valor de este parámetro, dejando en el eje vertical el número de ocurrencias de cada valor del SI. Siendo el percentil 95 de este índice de 0.42 y 0.33, para el HSI y VSI respectivamente, la integridad del procedimiento resulta ser validada, al no superar ninguno de los dos valores la unidad.

Este hecho puede contrastarse mediante el diagrama de Stanford. Para ambas situaciones, todas las épocas medidas se ubican en la región de operaciones nominales del diagrama, no presentando eventos de integridad. Mediante ambos métodos, la integridad queda validada.

10.4 Continuidad

El análisis de la continuidad y, como se verá más adelante, de la disponibilidad, se ha visto imposibilitado por el propio software, creyendo que existe un problema a nivel interno del programa que no ha sido posible solventar.

El análisis de la continuidad radica, pues, en el empleo de los informes realizados por el proveedor de servicios satelitales europeo, ESSP. La Figura 10.9

presenta un mapa del continente y, mediante una leyenda de colores, el valor de la continuidad en términos de riesgo durante el último mes; es decir, la probabilidad de que, al escoger una ventana temporal de 15 segundos, el sistema vea su funcionamiento interrumpido durante su transcurso:

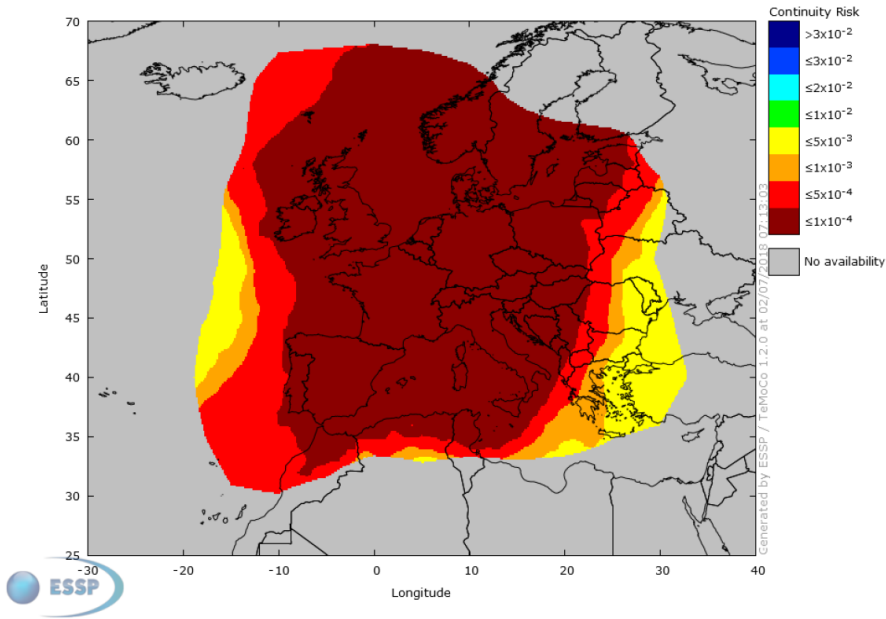


Figura 10.9: Continuidad del servicio para aproximaciones LPV-200 según la localización

En el mapa, puede verse como todo nuestro país se halla en la zona más oscura, suponiendo el valor de probabilidad más bajo posible. El valor requerido en aproximaciones LPV-200 se halla en el rango de 10^{-4} , y el valor proporcionado por el mapa es menor. De este modo, la continuidad, en base a la información obtenida desde ESSP, queda validada.

10.5 Disponibilidad

El método a seguir para analizar la disponibilidad es exactamente igual al mostrado en la sección anterior. Consultando los documentos generados por el proveedor ESSP, se obtiene el mapa de la Figura 10.10:

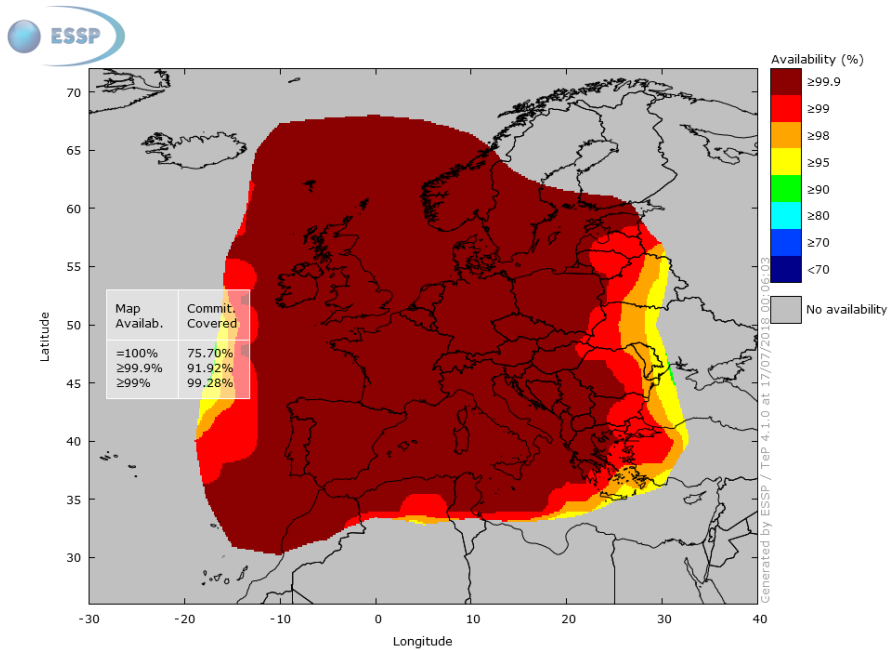


Figura 10.10: Disponibilidad del servicio para aproximaciones LPV-200 según la localización

De nuevo, todo el país se encuentra emplazado en la zona de color más oscuro, representando este color el mejor valor de disponibilidad (superior al 99.9 %). De esta forma, el requisito para la aproximación LPV-200 (99.0 %) se cumple.

Capítulo 11

Conclusiones

Hoy en día, la sociedad asiste atónita ante el rápido crecimiento de un sector desconocido por muchos hace cuestión de años: el mercado de los drones o aeronaves no tripuladas. Los mismos son cada vez más numerosos, así como las aplicaciones a las que sirven y el negocio entorno a estos sistemas. Igual de vertiginosa, pero más inadvertida por el público general, es la evolución del mundo de la navegación por satélite, cuyo papel en la economía mundial y la vida moderna es innegable; a pesar de ello, es fácil olvidar que hace una década posicionarse en casi cualquier punto del planeta resultaba mucho más complicado que pulsar un simple botón, además de ser mucho más caro.

La evolución de la tecnología permite disfrutar de un mundo mejor, más seguro y accesible para todos. En este Trabajo Fin de Grado confluyen los dos campos mencionados, para trabajar juntos en una aplicación nunca antes vista que podría suponer un aumento en la seguridad aérea, y una reducción de costes de gran importancia: el empleo de aeronaves no tripuladas para la validación de procedimientos basados en aumentación por satélite (SBAS).

El presente proyecto ha permitido, en primer lugar, profundizar en el conocimiento sobre los sistemas de navegación por satélite y los sistemas de aumentación, mostrando especial atención al sistema EGNOS, de gran interés en el panorama actual. Igualmente, el proceso de búsqueda bibliográfica ha tratado la normativa actual sobre aeronaves no tripuladas en España, y los procedi-

mientos de navegación basada en prestaciones (PBN), el método más actual de navegación a día de hoy, hacia el que todos los sistemas y procedimientos avanzan, en pos de un espacio aéreo más eficiente, limpio y seguro.

El conocimiento adquirido a lo largo del trabajo, y durante los cuatro años de duración del Grado en Ingeniería Aeroespacial, ha servido de base para culminar la validación de un procedimiento PBN de aproximación SBAS basada en EGNOS, conocido como LPV-200. El conocimiento relacionado con el software relativo al TFG, aprendido mediante la práctica continua y paciente, ha sido clave en el desarrollo final del proceso.

Partiendo del trabajo realizado en proyectos anteriores, se ha conseguido equipar un receptor de señal EGNOS real en una aeronave no tripulada, procediendo con el ensayo de vuelo. Los resultados obtenidos han permitido validar el procedimiento PBN, dando por concluido el presente Trabajo Fin de Grado, a la par que abriendo la puerta a nuevos proyectos e ideas basados en la combinación de estos campos de investigación.

Como ejemplos de posibles trabajos adicionales, sería recomendable realizar un ensayo de vuelo basado en la navegación por satélite, permitiendo establecer un plan de vuelo mediante *waypoints* y pilotado de manera automática, mejorando la precisión de la maniobra realizada la cual, por otra parte, no debe ser desmerecida. Habiendo validado el procedimiento PBN, la secuencia lógica consistiría en el diseño de la aproximación LPV-200 y su especificación de navegación, constituyendo un procedimiento PBN formal.

En otra dirección, resultaría llamativo emplear el RPAS en posesión de la Universidad para realizar la maniobra de aproximación, ejerciendo una ardua tarea de mantenimiento y equipando un piloto automático, obteniendo así un sistema de validación de procedimientos SBAS perteneciente por completo a la institución pública valenciana, sin depender de empresas o terceros.

El Trabajo Fin de Grado supone el final de una etapa, y el principio de otra. Las experiencias y el conocimiento obtenidos tras el paso por la Universitat Politècnica de València marcarán la diferencia en un mundo cada vez más competitivo y tecnológico, como bien demuestra el auge acelerado de los RPAS y los sistemas GNSS. Es el momento de aprovechar la oportunidad y subirse a un tren que no volverá a pasar; la buena noticia es que estamos a tiempo de hacerlo, y más preparados que nunca para afrontar los nuevos retos que están por venir.

Bibliografía

- [1] F.J. Sáez e Y. Portillo. *Descubrir la navegación aérea*. Centro de Documentación y Publicaciones de Aena, 2003 (vid. pág. 2).
- [2] S. Madry. *Global Navigation Satellite Systems and Their Applications*. SpringerBriefs in Space Development, 2015 (vid. págs. 3, 4, 7, 17, 20).
- [3] M.L. de Mateo García. *Descubrir la navegación por satélite*. Centro de Documentación y Publicaciones de Aena, 2004 (vid. págs. 3, 8).
- [4] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *EGNOS User Support: LPV Procedures Map*. Recuperado de https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map. 2018 (vid. págs. 5, 59).
- [5] Navipedia. *GNSS*. Recuperado de <http://www.navipedia.net/index.php/GNSS>. 2018 (vid. pág. 7).
- [6] B.W. Parkinson y J.J. Spilker. *Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I*. American Institute of Aeronautics y Astronautics, 1969 (vid. pág. 11).
- [7] Navipedia. *GPS General Introduction*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_General_Introduction. 2018 (vid. pág. 11).

- [8] Navipedia. *GLONASS General Introduction*. Recuperado de http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_General_Introduction. 2018 (vid. pág. 13).
- [9] Navipedia. *Galileo General Introduction*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction. 2018 (vid. pág. 14).
- [10] International Cospas-Sarsat Programme. *Cospas-Sarsat System*. Recuperado de <http://www.cospas-sarsat.int/en/system-overview/cospas-sarsat-system>. 2014 (vid. pág. 16).
- [11] Navipedia. *BeiDou General Introduction*. Recuperado de http://www.navipedia.net/index.php/BeiDou_General_Introduction. 2018 (vid. pág. 17).
- [12] Navipedia. *NAVIC*. Recuperado de <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>. 2018 (vid. pág. 18).
- [13] Navipedia. *GNSS Augmentation*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Augmentation. 2018 (vid. pág. 22).
- [14] Navipedia. *GNSS Performances*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Performances. 2018 (vid. pág. 22).
- [15] I. Quintanilla. *Integridad en EGNOS. Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía*. Universitat Politècnica de València, 2017 (vid. pág. 24).
- [16] Navipedia. *Integrity*. Recuperado de <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>. 2018 (vid. pág. 25).
- [17] Department of Defense. *GPS Standard Positioning Service Performance Standard*. 2008 (vid. pág. 28).
- [18] Organización de Aviación Civil Internacional. *Anexo 10. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Volumen II*. Sexta edición, 2001 (vid. pág. 33).

-
- [19] Navipedia. *SBAS Fundamentals*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals. 2018 (vid. pág. 34).
- [20] Organización de Aviación Civil Internacional. *Doc. 9849. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual*. 2005 (vid. pág. 36).
- [21] I. Quintanilla. *GPS: Modelos matemáticos. Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía*. Universitat Politècnica de València, 2017 (vid. pág. 36).
- [22] L. Gauthier y col. *EGNOS: The First Step in Europe's Contribution to the Global Navigation Satellite System*. European Space Agency, 2001 (vid. pág. 39).
- [23] D. Flament y col. *The EGNOS System Architecture explained*. European Space Agency, 2006 (vid. pág. 39).
- [24] GPS World. *The Almanac*. Recuperado de <http://gpsworld.com/the-almanac/>. 2018 (vid. pág. 39).
- [25] European Space Agency. *The EGNOS Signal Explained*. Recuperado de http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/2005%20Updated%20Fact%20Sheets/fact_sheet_12.pdf. 2005 (vid. pág. 40).
- [26] Radio Technical Commission for Aeronautics. *DO-229. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System airborne equipment*. 2006 (vid. pág. 41).
- [27] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *EGNOS Open Service (OS). Service Definiton Document*. Recuperado de https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/brochure_os_2017_v6.pdf. 2017 (vid. pág. 44).
- [28] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *EGNOS Data Access Service (EDAS). Service Definiton Document*. Recuperado de https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_edas_sdd_v2_1.pdf. 2014 (vid. pág. 44).

- [29] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *EGNOS Safety of Life (SoL). Service Definition Document*. Recuperado de https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf. 2016 (vid. págs. 45, 67-69).
- [30] Federal Aviation Administration. *Global SBAS Status*. Recuperado de https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/library/briefings/media/SBAS_Global_Status_June%202014.pdf. 2014 (vid. págs. 46, 47).
- [31] J. Vila. *Performance Based Navigation (PBN)*. Universitat Politècnica de València, 2018 (vid. págs. 51, 56).
- [32] European Organisation for the Safety of Air Navigation. *Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP)*. 2013 (vid. págs. 52, 54).
- [33] SKYbrary. *Performance Based Navigation (PBN)*. Recuperado de [https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Navigation_\(PBN\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Navigation_(PBN)). 2017 (vid. pág. 53).
- [34] Organización de Aviación Civil Internacional. *Documento 9613. Performance Based Navigation (PBN) Manual*. Tercera edición, 2008 (vid. págs. 53, 63).
- [35] Organización de Aviación Civil Internacional. *Anexo 6. Operación de aeronaves. Parte II*. Novena edición, 2016 (vid. pág. 55).
- [36] ENAV. *SBAS NPA, APV and Precision Approach CAT I*. Recuperado de http://galileo.cs.telespazio.it/medusa/PANS%20OPS%208168%20Advanced%20Class%20Rabat%2016-27%20March%202015/Training%20material%20&%20exam/SBAS%20NPA,%20APV%20AND%20PA%20CAT%20I_1.1.pdf. 2015 (vid. pág. 57).
- [37] ESSP European Global Navigation Satellite Systems Agency. *Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation*. Recuperado de https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/LPV_Implementation_Guidelines_Airports_Operators_0.pdf. 2015 (vid. pág. 57).

-
- [38] European Global Navigation Satellite Systems Agency y ESSP. *EGNOS LPV-200 Enables Safer Aircraft Landings*. Recuperado de <https://www.gsc-europa.eu/news/egnos-lpv-200-enables-safer-aircraft-landings>. 2018 (vid. pág. 57).
- [39] European Global Navigation Satellite Systems Agency y ESSP. *First EGNOS LPV-200 approach implemented at Charles de Gaulle Airport*. Recuperado de <https://www.gsa.europa.eu/news/first-egnos-lpv-200-approach-implemented-charles-de-gaulle-airport>. 2016 (vid. pág. 58).
- [40] European Commission. *SESAR: Modernising Air Traffic Management in Europe*. Recuperado de https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/sesar/doc/2008_sesar_brochure_en.pdf. 2008 (vid. pág. 60).
- [41] María del C. Furquet. *Trabajo Fin de Grado. Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/heliódromos*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València, 2016 (vid. pág. 71).
- [42] M. Linares. *Trabajo Fin de Grado. Validación y diseño de procedimientos SBAS. Análisis de la metodología operacional en ensayo de vuelo y su aplicación en procedimientos RNAV*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València, 2017 (vid. pág. 71).
- [43] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española. Aceptión de "dron"*. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=ED2QqnQ>. 2018 (vid. pág. 73).
- [44] ICEX España Exportación e Inversiones. *Los drones culminan su despegue*. Recuperado de <https://www.icex.es/icex/es/Navegacion-zona-contacto/revista-el-exportador/observatorio2/REP2018780253.html>. 2018 (vid. pág. 74).
- [45] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. *Boletín Oficial del Estado. Número 316*. Recuperado de <https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf>. 2017 (vid. pág. 76).

- [46] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*. Recuperado de http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf. 2017 (vid. pág. 79).
- [47] Zenit Drones. *Metodología SORA. Estudios aeronáuticos de seguridad específicos*. Recuperado de <https://zenitdrones.com/metodologia-sora/>. 2017 (vid. pág. 80).
- [48] Septentrio. *RxTools. User Manual*. Septentrio NV/SA, 2018 (vid. pág. 82).
- [49] GNSS Tools Team. *PEGASUS Software User Manual*. EUROCONTROL, 2011 (vid. pág. 83).
- [50] ENAIRE. *Planifique su operación con Drones*. Recuperado de <https://drones.enaire.es/>. 2018 (vid. pág. 89).
- [51] Septentrio. *AsteRx2 Product Family Hardware Manual*. Septentrio NV/SA, 2014 (vid. pág. 90).
- [52] Septentrio. *PolaNt: GPS and GPS/GLONASS antenna*. Septentrio NV/SA, 2008 (vid. pág. 91).
- [53] National Oceanic y Atmospheric Administration. *Planetary K-Index*. Recuperado de <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>. 2018 (vid. pág. 97).

Documento II: Pliego de condiciones

Condiciones generales

General

Cualquier puesto de trabajo en el que, de manera habitual y durante gran parte del horario laboral, se haga uso de un equipo con pantalla de visualización retroiluminada, está sujeto a una serie de riesgos que deben prevenirse. Este tipo de trabajos ejemplifica a la perfección cómo la tecnología puede conllevar riesgos nuevos en el entorno laboral, como problemas de visión, problemas posturales y lesiones producidas por movimientos repetitivos o estrés.

El Real Decreto 488/1997 establece un conjunto de disposiciones mínimas de seguridad y salud con el objetivo de mitigar y reducir los posibles efectos asociados a estas prácticas. El Real Decreto es de aplicación a la hora de utilizar equipos con pantallas de visualización, casos en los que se aplican las disposiciones de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales.

Las variables principales de interés que deben tenerse en cuenta a la hora de prevenir los riesgos a los que el trabajador puede enfrentarse en el Trabajo Fin de Grado son:

- Tiempo de permanencia ante la pantalla, de manera continua o discontinua.
- Tiempo de trabajo expuesto antes pantallas de visualización.

- Exigencia y grado de complejidad de la tarea asignada al operario ante la pantalla.
- Necesidad de obtener información precisa y rápidamente.

En cuanto a la prevención de riesgos laborales, deben tenerse en cuenta ciertos factores generales:

- Seguridad: Referida a caídas o golpes, contactos eléctricos o similares, en el puesto de trabajo.
- Higiene industrial: Iluminación, ruido, condiciones termo-higrométricas, transmisiones de virus o bacterias nocivas a través del contacto con el teclado.
- Ergonomía: Fatiga física y visual, picores, visión borrosa, ansiedad, insomnio, irritabilidad.

Real Decreto 488/1997 del 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 éstas, 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 puestos 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.

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.

Condiciones de especificaciones técnicas

Especificaciones de materiales y equipos

Hardware.

La realización del proyecto requiere de un equipo capaz de realizar los procesos de cálculo de manera eficaz y cómoda, a tenor de las simulaciones que se realizan. De los dos programas principales, el software PEGASUS es el que mayores prestaciones requiere, necesitando, como mínimo, un procesador Intel-Pentium de 350 MHz de velocidad de lectura, 60 Mb de almacenamiento disponible, 1 GB de almacenamiento extra para el procesamiento de los datos, y 128 Mb de memoria RAM para el correcto funcionamiento del programa. El cumplimiento de estas prestaciones mínimas se alcanza mediante un equipo portátil marca MSI, que cumple sobradamente con las especificaciones.

Software.

Se detalla la lista de programas empleados para la realización del proyecto:

- L^AT_EX
- Microsoft Office
- Adobe Acrobat Pro

- Google Earth
- MATLAB
- RxTools
- PEGASUS

De todos los programas, PEGASUS y RxTool han supuesto un mayor esfuerzo en término computacional y de aprendizaje, al requerir diversos manuales para lograr su completo funcionamiento.

Conexión a Internet.

El desarrollo del proyecto es muy dependiente de la conexión a Internet, al requerir de la misma para proceder con la consulta de manuales o la revisión bibliográfica. Igualmente, el procedimiento de alta y finalización del TFG, y la herramienta de correo Gmail, precisan de esta conexión para operar. No es necesario un gran ancho de banda, aunque sí recomendable, para asegurar una conexión óptima y de calidad.

Conocimientos previos.

El proyecto, debido a su temática particular, requiere conocimientos previos relacionados con los ámbitos de la certificación de procedimientos, navegación aérea, fabricación aeroespacial, sistemas GNSS y programación. De cara al alumno, la disciplina, la autonomía y el esfuerzo son valores indispensables en un trabajo de tal magnitud. El inglés como lengua vehicular es muy aconsejable, debido al alto número de trabajos relacionados en esta lengua.

Conocimientos informáticos.

Además del proceso de aprendizaje de los nuevos programas, el manejo básico de herramientas ofimáticas y ordenadores personales es indispensable, al realizarse gran parte del trabajo a través del ordenador y requerir una gran carga de redacción.

Material adicional.

Se empelarán documentos y escritos localizados en bibliotecas de la Universidad y en Internet, y ha sido necesario el uso de un dron perteneciente a la empresa EtecDrones para realizar el montaje; este último ha precisado de material diverso con el que fabricar los componentes, con lo que el acceso a un

laboratorio de fabricación y electrónica permitirá solventar la parte correspondiente del trabajo.

Supervisión.

La realización del proyecto debe ser supervisada por el tutor del proyecto, quien deberá tener experiencia amplia y contrastada en el campo de conocimiento y la ejecución de proyectos relacionados con la validación y certificación de procedimientos PBN. La mayoría de dichos proyectos deberán haberse llevado a cabo satisfactoriamente en términos de presupuesto, especificaciones, plazos y aceptación posterior por parte del cliente.

Especificaciones de operación

La operación de una aeronave no tripulada debe estar sujeta a la normativa vigente, obtenida del Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre. Se exponen las características de la aeronave y el vuelo:

- Vuelo recreativo.
- Vuelo en línea de visión (VLOS).
- Sin captura de fotografía o vídeo.
- Peso de la aeronave entre 2 y 150 kilogramos.
- Vuelo diurno.
- Si sobrevuelo de personas o edificaciones.

En base a la misma, se extraen las limitaciones y normas de vuelo:

1. No volar dentro de las distancias de seguridad de aeropuertos o aeródromos, en espacio aéreo controlado, en zonas de información de vuelo (FIZ) o en zonas de tránsito de aeródromo (ATZ).
2. No volar en zonas donde se realicen otros vuelos a baja altura, ni en zonas reservadas, prohibidas o restringidas.
3. El dron debe estar siempre en línea de visión, pudiendo alejarse una distancia máxima de 500 metros, a una altura máxima de 120 metros. Si se usan gafas FV, deberá volarse acompañado de observadores que monitoricen el vuelo.

4. Volar en condiciones meteorológicas de vuelo visual, y de día.
5. Aunque no es necesario ser piloto, el aparato debe volarse con seguridad y bajo supervisión de un adulto.
6. Se recomienda un seguro a terceros, en base a los daños que pueda causar el dron.
7. El dron debe estar identificado, evitando volar cargado con objetos o sustancias peligrosas.

Documento III: Presupuesto

Presupuesto

El estudio del presupuesto permite estimar el coste aproximado que supondría la réplica del desarrollo del trabajo completo por parte de un ingeniero recién egresado. El documento se dividirá en tres secciones: costes de personal, costes de equipo y software, y costes indirectos.

Los costes de personal derivan del gasto humano requerido para crear el conocimiento tras el proyecto, incluyendo reuniones de profesor y tutor, trabajo independiente y tiempo de redacción. Los costes de equipo y software representan el gasto de licencias, programas y hardware necesarios para la realización del proyecto, y deben tener en cuenta la amortización. Finalmente, los costes indirectos derivan del uso de las instalaciones, consumo de electricidad y otros.

Costes de personal

La cantidad de horas invertidas en el proyecto se obtiene por estimación, asumiendo una dedicación de 8 horas diarias, 5 días a la semana, desde la mitad del mes de mayo hasta la mitad del mes de julio. En total, se contabilizan 8 semanas, correspondientes a 2 meses, lo que arroja un total de 320 horas dedicada. Las horas de dedicación de los tutores se fija en 20 horas. El personal del soporte técnico de EtecDrones invirtió 13 horas en el proyecto.

Para los costes por hora del personal, se establece un pago de 15 euros por hora en caso de un Ingeniero Graduado, mientras que el coste del tutor asciende a 30 euros la hora, al tratarse de un Ingeniero Doctor. La tarifa estándar del

servicio técnico para modificaciones y adaptaciones de equipos es de 75 euros la hora. La Tabla 11.1 muestra los valores fijados y el coste de personal:

Recurso	Horas dedicadas	Coste horario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero Doctor	20	30,00	600,00
Ingeniero Graduado	320	15,00	4800,00
Servicio Técnico	13	75,00	975,00
Subtotal 1	-	-	6375,00

Tabla 11.1: Costes de personal

Costes de equipos y software

Los costes de equipos y software han de tener en cuenta la amortización de cada elemento. De todo el software empleado, únicamente las licencias de MATLAB y Microsoft Office son de pago. El alquiler del dron también se incluye en este apartado, siendo su precio diario. Igualmente, el equipo portátil también debe tenerse en cuenta. La Tabla 11.3 presenta los costes de amortización asociados a estos componentes:

Recurso	Coste total (€)	Período de amortización (meses)	Período amortizado (meses)	Importe (€)
Ordenador MSI GE73	2000,00	60	6	200,00
Licencia Microsoft Office	160,00	12	2	26,66
Licencia MATLAB	800,00	12	2	133,33
Alquiler RPAS	700	-	-	700,00
Subtotal 2	-	-	-	1059,99

Tabla 11.2: Costes de equipos y software

Costes indirectos

Los costes indirectos son costes derivados del proyecto, debido a gastos de luz, administración, climatización o agua, entre otros. Su estimación resulta de gran complejidad, con lo que se estima su valor en un 5 % del total del presupuesto.

Coste total

Finalmente, el presupuesto total consiste en la suma de los subtotales desglosados en las secciones anteriores, teniendo en cuenta los costes indirectos y el IVA del 21 %. El desglose completo puede verse en la Tabla ??:

Concepto	Importe (€)
Subtotal 1	6375,00
Subtotal 2	1059,99
Costes indirectos	371,75
Total (sin IVA)	7806,74
IVA	1639,42
TOTAL	9446,16

Tabla 11.3: Desglose del coste total

El presupuesto total para el proyecto presente asciende a NUEVE MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y SEIS EUROS CON DIECISÉIS CÉNTIMOS.