



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Validación y diseño de una
aproximación SBAS LPV-200 en el
aeropuerto de Gran Canaria**

Autor: Unai Pardo Benet

Tutor: Israel Quintanilla García

Cotutora: Áurea Cecilia Gallego Salguero

Valencia, agosto de 2021

Resumen

A lo largo de esta memoria, se encuentran todos los documentos de los que se compone el Trabajo de Fin de Grado titulado “Validación y diseño de una aproximación SBAS LPV-200 en el aeropuerto de Gran Canaria”. Este trabajo actúa como conclusión para el Grado en Ingeniería Aeroespacial, cursado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) dentro de la Universitat Politècnica de València (UPV).

Asimismo, este proyecto ha sido realizado en la localidad de Valencia con una duración aproximada de 5 meses, finalizándose este en el mes de agosto del año 2021. El autor del Trabajo de Fin de Grado ha sido D. Unai Pardo Benet, que ha seguido este proceso comandado por su tutor académico, el Prof. D. Israel Quintanilla García y su cotutora, la Prof^a. Dña. Áurea Cecilia Gallego Salguero.

En cuanto al contenido del Trabajo de Fin de Grado, este se puede dividir en dos partes. Una primera parte en la cual se lleva a cabo el estudio de la posible validación de una aproximación SBAS LPV-200 para el Aeropuerto de Gran Canaria en su pista 21R. Este espacio se centra en el estudio del sistema EGNOS, con el fin de evaluar la cobertura que el mismo ofrece a las Islas Canarias, ya que su servicio en tal ubicación no resulta tan eficiente como en otras partes de Europa. Con tal propósito, se emplea como base la aplicación PEGASUS de EUROCONTROL, para obtener los resultados de la validación de manera correcta.

En segundo lugar, una vez realizada la validación y obtener resultados no satisfactorios, se diseña la aproximación en el entorno del aeropuerto de Gran Canaria con el fin de que, en el momento en que el sistema EGNOS mejore sus servicios en la zona, se disponga de un diseño adecuado para tal aproximación. Para ello, se traza en primera instancia la trayectoria nominal, para acompañarla de las superficies de protección asociadas a cada tramo junto con sus márgenes de franqueamiento de obstáculos.

Además, de manera previa a las dos partes mencionadas, se analiza de manera detallada los fundamentos teóricos que sirven como base para la realización de la parte práctica de este trabajo.

Índice general

Resumen	2
Listado de acrónimos.....	9
Listado de figuras.....	13
Listado de tablas	15
Introducción.....	17
Objetivos	18
DOCUMENTO I – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
1. GNSS	20
1.1 GPS	21
1.2 GLONASS.....	26
1.3 Galileo.....	28
1.4 BeiDou	31
1.5 IRNSS o NAVIC	32
1.6 QZSS	33
2. Sistemas de Aumentación	35
2.1 ABAS	35
2.2 GBAS	36
2.3 SBAS	36
2.4 Requerimientos	37
2.4.1 Precisión.....	37
2.4.2 Integridad.....	37
2.4.3 Disponibilidad	40
2.4.4 Continuidad.....	40
3. SBAS.....	42
3.1 Fundamento matemático	43

3.2 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)	45
3.2.1 Arquitectura	45
3.2.2 Mensajes EGNOS.....	48
3.2.3 Servicios	51
3.3 Sistemas SBAS adicionales	52
3.3.1 WAAS	53
3.3.2 MSAS	53
3.3.3 GAGAN.....	54
4. PBN (Performance Based Navigation)	55
4.1 Preámbulo.....	55
4.2 Concepto PBN.....	56
4.3 Especificaciones de navegación.....	58
4.4 Especificaciones en aproximaciones (RNP/AR APCH).....	60
4.5 SESAR.....	62
5. Requisitos de prestaciones para aproximaciones LPV-200	65
5.1 Precisión	65
5.1.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200	65
5.2 Integridad	66
5.2.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200	67
5.3 Continuidad	68
5.3.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200	68
5.4 Disponibilidad.....	69
5.4.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200	70
6. Validación de procedimientos SBAS.....	71
6.1 Toma de datos a largo plazo	71
6.2 Toma de datos a corto plazo (sobre el terreno)	71
6.3 Ensayos de vuelo	72
DOCUMENTO II – VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS SBAS LPV-200.....	73
7. Formato de los mensajes	74
7.1 RTCM.....	74
7.2 NTRIP	74
7.3 RTCA	75
7.4 NMEA.....	75
7.5 RINEX.....	75
7.5.1 Fichero de observación.....	77
7.5.2 Fichero de navegación.....	80

8. Software	84
8.1 Obtención de datos	84
8.1.1 Red de Estaciones Permanentes de Canarias	87
8.1.2 Servicio FTP de EDAS (EGNOS).....	89
8.1.3 WinSCP	92
8.2 Hatanaka.....	92
8.3 TEQC	94
8.4 PEGASUS.....	95
8.4.1 Módulo <i>Convertor</i>	98
8.4.2 Módulo <i>GNSS_Solution</i>	100
8.4.3 Módulo <i>XPL_Estimation</i>	103
8.4.4 Módulo <i>M-File Runner</i>	106
9. Resultados obtenidos en la validación	109
9.1 Toma de datos a largo plazo	109
9.1.1 Resultados de precisión.....	110
9.1.2 Resultados de integridad	111
9.1.3 Resultados de disponibilidad.....	112
9.1.4 Resultados de continuidad.....	114
9.2 Toma de datos a corto plazo	115
9.2.1 Resultados de precisión.....	115
9.2.2 Resultados de integridad	116
9.2.3 Resultados de disponibilidad.....	121
9.2.4 Resultados de continuidad.....	123
10. Conclusiones sobre la validación de la aproximación	125
DOCUMENTO III – DISEÑO DE LA APROXIMACIÓN SBAS LPV-200	127
11. Descripción general del diseño	128
11.1 Introducción.....	128
11.2 Aeropuerto de Gran Canaria	128
11.2.1 Generalidades	128
11.2.2 Procedimiento de llegada actual en el aeropuerto.....	133
11.3 Aeronave elegida para el diseño de la aproximación.....	134
11.3.1 Características de la aeronave.....	134
12. Descripción general de la aproximación	137
12.1 Introducción.....	137
12.2 Fases de la aproximación.....	137
12.3 Factores asociados al diseño de la aproximación.....	139

12.3.1 Determinación de la categoría del B747-400	139
12.3.2 Gama de velocidades asociadas a cada tramo	140
12.3.3 Protecciones asociadas a cada tramo.....	141
12.3.4 Cálculo de la velocidad verdadera	144
12.3.5 Protección de virajes.....	144
12.3.5.1 Protección del límite exterior del viraje	145
12.3.5.2 Protección del límite interior del viraje	146
12.3.5.3 Situación de los puntos de viraje anterior y posterior.....	146
12.3.5.4 Construcción de la protección del viraje	147
12.3.6 Longitud mínima de un tramo limitado por dos puntos de recorrido	148
12.4 Circuito de espera	151
12.5 Tramo de aproximación inicial	156
12.6 Tramo de aproximación intermedia	157
12.7 Tramo de aproximación final	158
12.7.1. Superficie de evaluación de obstáculos	158
12.8 Tramo de aproximación frustrada	162
13. Construcción de la aproximación para la pista 21R.....	163
13.1 Circuito de espera	163
13.2 Aproximación inicial.....	163
13.3 Aproximación intermedia	164
13.4 Aproximación final.....	164
13.4.1 Superficies de evaluación de obstáculos	164
13.4.2 Determinación de la altitud / altura de franqueamiento de obstáculos.....	165
13.5 Aproximación frustrada.....	166
13.6 Representación del trayecto nominal de la ruta	167
13.6.1 Tramos de aproximación inicial, intermedia y final.	167
13.6.2 Tramo de aproximación frustrada	168
13.6.3 Puntos de referencia de la ruta	169
13.6.4 Representación conjunta de la aproximación	170
13.7 Superficies de franqueamiento de obstáculos	171
14. Conclusiones sobre el diseño de la aproximación	175
DOCUMENTO IV – PLIEGO DE CONDICIONES.....	176
15. Condiciones generales.....	177
15.1 General	177
15.2 Especificaciones técnicas.....	178
15.2.1 Objeto	178

15.2.2 Condiciones de los materiales	178
15.2.2.1 <i>Hardware</i>	178
15.2.2.2 <i>Software</i>	178
15.2.3 Condiciones de la ejecución.....	179
15.2.3.1 Conexión a Internet	179
15.2.3.2 Conocimientos previos	179
15.2.3.3 Conocimientos informáticos.....	180
15.2.3.4 Supervisión.....	180
DOCUMENTO V - PRESUPUESTO	181
16. Presupuesto	182
16.1 Introducción.....	182
16.1.1 Costes de personal	182
16.1.2 Costes de <i>software</i> y equipos	183
16.1.3 Costes indirectos	183
16.2 Desglose de costes	183
16.2.1 Desglose de costes de personal	183
16.2.2 Desglose de costes de <i>software</i> y equipos	184
16.2.3 Desglose de costes indirectos.....	185
16.2.4 Costes totales	185
Bibliografía.....	186

Listado de acrónimos

ABAS	<i>Aircraft-Based Augmentation System</i>
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i>
AL	<i>Alert Limit</i>
APV	<i>Approach Procedure with Vertical Guidance</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
ATZ	<i>Aerodrome Traffic Zone</i>
B-RNAV	<i>Basic Area Navigation</i>
CCF	<i>Central Control Facility</i>
CDDS	<i>Commercial Data Distribution Service</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
C/A	<i>Coarse/Acquisition</i>
CE	<i>Comisión Europea</i>
CEP	<i>Circular Error Probable</i>
CNAV	<i>Civil Navigation</i>
CNS	<i>Communication, Navigation and Surveillance</i>
CPF	<i>Central Processing Facility</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DH	<i>Decision Height</i>
DME	<i>Distance Measuring Equipment</i>
DSS	<i>Decision Support System</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ERGNSS	<i>Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESSP	<i>European Satellite Services Provider</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>

EWAN	<i>EGNOS Wide Area Network</i>
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FAP	<i>Final Approach Point</i>
FDE	<i>Fault Detection and Exclusion</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FMS	<i>Flight Management System</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GCC	<i>Galileo Control Centre</i>
GCS	<i>Galileo Control Segment</i>
GDOP	<i>Geometric Dilution of Precision</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GMS	<i>Galileo Mission Segment</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSS	<i>Galileo Sensor Station</i>
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
IAF	<i>Initial Approach Fix</i>
IFR	<i>Instrumental Flight Rules</i>
IGN	<i>Instituto Geográfico Nacional</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i>
ILS	<i>Instrumental Landing System</i>
INC	<i>IRNSS Navigation Centre</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigational Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
LNAV	<i>Lateral Navigation</i>
LP	<i>Localizer Performance</i>
LPV	<i>Localizer Performance with Vertical Guidance</i>
LORAN	<i>LONg RANge Navigation</i>

MCC	<i>Mission Control Centre</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MOPS	<i>Minimum Operational Performance Standards</i>
MS	<i>Monitor Station</i>
MSAS	<i>MTSAT Satellite Augmentation System</i>
MTOM	<i>Maximum Take Off Mass</i>
NAVIC	<i>Navigation Indian Constellation</i>
NAVSTAR	<i>Navigation Satellite Timing & Ranging</i>
NDB	<i>Non-Directional Beacon</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Station</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NPA	<i>Non-Precision Approach</i>
NSE	<i>Navigation System Error</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OACI	<i>Organización de Aviación Civil Internacional</i>
OS	<i>Open Service</i>
PA	<i>Precision Approach</i>
PBN	<i>Performance-Based Navigation</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
P-RNAV	<i>Precision Area Navigation</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PS	<i>Precision Service</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RIMS	<i>Ranging Integrity Monitoring Station</i>
RNAV	<i>aRea Navigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real-Time Kinematic</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SAR	<i>Search and Rescue Service</i>

SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SCC	<i>System Control Centre</i>
SES	<i>Single European Sky</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SID	<i>Standard Instrument Departure</i>
SIS	<i>Signal In Space</i>
SLR	<i>Laser Ranging Station</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SoL	<i>Safety of Life</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
STAR	<i>Standard Arrival Route</i>
TACAN	<i>Tactical Air Navigation System</i>
TMA	<i>Terminal Control Area</i>
TSE	<i>Total System Error</i>
TTA	<i>Time to Alert</i>
TT&C	<i>Telemetry, Tracking and Control</i>
UDRE	<i>User Differential Range Error</i>
UE	<i>Unión Europea</i>
VDB	<i>VHF Data Broadcast</i>
VNAV	<i>Vertical Navigation</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>

Listado de figuras

- Figura 1.1: Programa de modernización de la constelación GPS [9]
- Figura 1.2: Espectro de frecuencias de Galileo [13]
- Figura 3.1: Distribución de las instalaciones del Segmento Terrestre de EGNOS [19]
- Figura 4.1: Componentes de la navegación PBN [22]
- Figura 4.2: Especificaciones de navegación PBN [22]
- Figura 4.3: Tipos de aproximaciones [43]
- Figura 4.4: Previsión para 2035 del programa SESAR [23]
- Figura 8.1: Estación permanente de Agüimes de ERGNSS [27]
- Figura 8.2: Interfaz del FTP de GRAFCAN
- Figura 8.3: Interfaz del FTP de EGNOS EDAS
- Figura 8.4: Interfaz del programa WinSCP
- Figura 8.5: Consola de Windows con los comandos de uso de Hatanaka
- Figura 8.6: Consola de Windows 10 con los comandos de uso de TEQC
- Figura 8.7: Interfaz de PEGASUS
- Figura 8.8: Archivos obtenidos tras la instalación de PEGASUS
- Figura 8.9: Ventana de cambio de propiedades en PEGASUS
- Figura 8.10: Módulo Convertor preparado para ser ejecutado
- Figura 8.11: Módulo Convertor tras su ejecución
- Figura 8.12: Módulo GNSS_Solution preparado para ser ejecutado
- Figura 8.13: Módulo GNSS_Solution tras su ejecución
- Figura 8.14: Módulo XPL_Estimation preparado para su ejecución
- Figura 8.15: Primera parte del almanaque GPS del día 095
- Figura 8.16: Módulo M-File Runner
- Figura 9.1: Estaciones RIMS usadas en el informe [35]
- Figura 11.1: Situación del aeropuerto de Gran Canaria con respecto a los principales municipios de su entorno
- Figura 11.2: Vista aérea del aeropuerto de Gran Canaria
- Figura 11.3: Evolución del número de pasajeros en el aeropuerto de Gran Canaria [44]
- Figura 11.4: Extracto de la carta de aproximación por instrumentos del aeropuerto de Gran Canaria [45]
- Figura 11.5: Boeing 747-400 de la compañía Iberia [46]
- Figura 11.6: Vista en planta del Boeing 747-400 [48]
- Figura 11.7: Vista lateral del Boeing 747-400 [48]

Figura 12.1: Tramos de la aproximación [41]

Figura 12.2: Áreas primaria y secundaria [41]

Figura 12.3: Protección de un viraje igual o menor de 90° con el método de espirales de viento [41]

Figura 12.4: Puntos de paso y sobrevuelo [41]

Figura 12.5: Relación entre la inclinación lateral, el radio de viraje y la velocidad para el circuito de espera [41]

Figura 12.6: Área primaria del circuito de espera [41]

Figura 12.7: Áreas primaria y secundaria del tramo inicial de la aproximación [41]

Figura 12.8: Áreas primaria y secundaria del tramo intermedio de la aproximación [41]

Figura 12.9: Sistema de referencia empleado por las OAS [41]

Figura 12.10: Vista en perspectiva de las OAS [41]

Figura 12.11: Vista frontal, lateral y en planta de las OAS [41]

Figura 12.12: Ubicación del GARP con respecto a la pista [41]

Figura 12.13: Interfaz del programa PANS-OPS [41]

Figura 13.1: Evaluación de los obstáculos en las superficies OAS

Figura 13.2: Tramo de aproximación inicial, intermedia y final

Figura 13.3: Perfil de elevación del tramo de aproximación inicial, intermedia y final

Figura 13.4: Tramo de aproximación frustrada

Figura 13.5: Perfil de elevación del tramo de aproximación frustrada

Figura 13.6: Representación de la aproximación completa

Figura 13.7: Protección del circuito de espera

Figura 13.8: Protección de los tramos de aproximación inicial, intermedia y final

Figura 13.9: Protección del tramo de aproximación frustrada

Figura 13.10: Protección de la aproximación completa

Listado de tablas

- Tabla 1.1: Programa de modernización de GLONASS [10]
- Tabla 3.1: Tipos de mensajes SBAS [2]
- Tabla 5.1: Requisitos de precisión de la OACI [24]
- Tabla 5.2: Valores de precisión ofrecidos por EGNOS [18]
- Tabla 5.3: Requisitos de integridad de la OACI [24]
- Tabla 5.4: Valores de integridad ofrecidos por EGNOS [18]
- Tabla 5.5: Requisitos de continuidad de la OACI [24]
- Tabla 5.6: Valores de continuidad ofrecidos por EGNOS [18]
- Tabla 5.7: Requisitos de disponibilidad de la OACI [24]
- Tabla 5.8: Valores de disponibilidad ofrecidos por EGNOS [18]
- Tabla 7.1: Estructura de las cabeceras de los ficheros RINEX de observación [26]
- Tabla 7.2: Estructura de los datos de los ficheros RINEX de observación [26]
- Tabla 7.3: Estructura de cabeceras y datos de los ficheros RINEX de navegación [26]
- Tabla 9.1: Resultados de la precisión del estudio de largo plazo
- Tabla 9.2: Resultados de la integridad del estudio de largo plazo
- Tabla 9.3: Resultados de la disponibilidad del estudio de largo plazo
- Tabla 9.4: Resultados de la disponibilidad SIS del estudio de largo plazo
- Tabla 9.5: Resultados de la continuidad del estudio de largo plazo
- Tabla 9.6: Resultados de precisión en el estudio a corto plazo
- Tabla 9.7: Resultados de integridad en el estudio a corto plazo
- Tabla 9.8: Resultados de disponibilidad en el estudio a corto plazo
- Tabla 9.9: Resultados de continuidad en el estudio a corto plazo
- Tabla 11.1: Características del Boeing 747-400 [49]
- Tabla 12.1: Categorías de aeronave [41]
- Tabla 12.2: Velocidades asociadas a cada uno de los tramos de la aproximación [41]
- Tabla 12.3: Valores intermedios para cada uno de los tramos de la aproximación [41]
- Tabla 12.4: Semianchura del área para cada uno de los tramos de la aproximación [41]
- Tabla 12.5: Situación punto anterior y posterior de viraje [41]

Tabla 12.6: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de paso, 15 ° de inclinación [41]

Tabla 12.7: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de paso, 25 ° de inclinación [41]

Tabla 12.8: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de sobrevuelo, 15 ° de inclinación [41]

Tabla 12.9: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de sobrevuelo, 25 ° de inclinación [41]

Tabla 12.10: Velocidades asociadas al circuito de espera [41]

Tabla 12.11: Márgenes de franqueamiento de obstáculos en el área de espera [41]

Tabla 12.12: Margen de pérdida de altura en función de la categoría de aeronave [41]

Tabla 13.1: Coordenadas de los vértices de las OAS

Tabla 13.2: Puntos de referencia de la aproximación

Tabla 16.1: Desglose de costes de personal

Tabla 16.2: Desglose de costes de software y equipos

Tabla 16.3: Costes totales

Introducción

El transporte aéreo se trata de un sector que ha estado evolucionando continuamente desde su inicio. Esto se debe a que la aviación tanto comercial como militar constituye uno de los puntos más importantes en cuanto a relaciones entre estados y sociedades se refiere.

Con la evolución de este sector se han desarrollado una gran cantidad de nuevas técnicas de navegación aérea. Sin embargo, actualmente, las técnicas de navegación basadas en radioayudas concentran la mayoría de procedimientos gracias al nivel de funcionamiento y fiabilidad que han conseguido demostrar.

Como contraposición a estas técnicas, se ha desarrollado en los últimos años una alternativa que ofrece mejores prestaciones, y que se espera que sustituya a la navegación basada en radioayudas. Este tipo de navegación es la navegación basada en satélites trabajando de forma conjunta con diversos sistemas de aumentación.

En este contexto, la comunidad europea pretende ofrecer dentro de su zona nuevos servicios de navegación con una mejor oferta de servicios. Este proyecto tiene como base el sistema GALILEO acompañado por el sistema de aumentación basado en satélites EGNOS.

La transición entre los sistemas basados en radioayudas actuales hacia los sistemas basados en satélites conforma un proceso lento, pero que se pretende llevar a cabo en los siguientes años. Tanto es así que el empleo de procedimientos basados en sistemas SBAS (sistemas de aumentación basados en satélites) se encuentra ya en una fase avanzada contando con una gran cantidad de procedimientos aprobados en países como Alemania y Francia [1].

En cuanto a España, dentro de sus límites territoriales se cuenta con únicamente 6 aproximaciones SBAS validadas, por lo que el gobierno español ha planeado por el momento la validación de 28 procedimientos más a lo largo de todo el territorio estatal, concentrándose principalmente en zonas de costa y las islas. De tal modo, uno de los aeropuertos en los que se planea realizar una de estas aproximaciones es el aeropuerto de Gran Canaria, que pasa a ser el objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Grado [1].

Por otra parte, el archipiélago de las Islas Canarias no recibe en algunas ocasiones un servicio lo suficientemente bueno por parte del sistema EGNOS, hecho que no agrada a la comunidad europea, ya que se pretende dar cobertura a todo el continente. Es por ello que este trabajo sirve además como estudio de las prestaciones que ofrece el sistema EGNOS en el entorno de las Islas Canarias.

Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como fin principal la validación y el diseño de una aproximación SBAS LPV-200 para la pista 21R del aeropuerto de Gran Canaria. Este es el objetivo general del trabajo, pero, dentro de tal propósito, se pueden diferenciar varios objetivos específicos como los expuestos a continuación:

- En primer lugar, a través de los fundamentos teóricos se tratan de consolidar los conocimientos adquiridos en cuestión de aeronavegación y sistemas de navegación y de aumentación basados en satélites.
- Comprender el proceso de validación de un procedimiento SBAS LPV-200 además de aplicarlo para la pista 21R del aeropuerto de Gran Canaria.
- Adquirir conocimientos y experiencia en el uso del *software* PEGASUS, que es una aplicación con muchas funcionalidades dentro del entorno de la aeronavegación.
- Realizar el estudio previo al diseño de la aproximación analizando tanto las superficies como los obstáculos que forman parte del entorno del aeropuerto.
- Elaborar el diseño de la aproximación de manera gráfica empleando la aplicación de Google Earth para mostrar los resultados.

Asimismo, una vez concluida cada una de las partes de este trabajo, se ofrecerán a modo de resolución, las conclusiones extraídas de los resultados obtenidos en cada uno de los procesos.

DOCUMENTO I

FUNDAMENTO TEÓRICOS

Capítulo 1

GNSS

Un sistema GNSS se trata de una constelación de satélites que orbitan alrededor de la Tierra y transmiten señales propias con el fin de poder determinar, con una cobertura global, la posición de los usuarios de este sistema en la superficie de la Tierra. El primer sistema GNSS operativo fue el GPS, originalmente Navstar GPS, que consiguió la operatividad completa en el año 2011, al igual que la constelación rusa GLONASS. Por otra parte, los sistemas Galileo (europeo) y BeiDou (chino) se encuentran actualmente en desarrollo en diferentes fases de su creación [2].

Existen diferentes tipos de órbitas basándonos en la altitud de estas, pues bien, los satélites que forman parte de las constelaciones GNSS actuales se encuentran situados en órbitas MEO, a alrededor de 20000 km de altitud. Las constelaciones se suelen componer de 20 a 30 satélites localizados en de 3 a 6 órbitas circulares inclinadas con planos equidistantes.

La obtención de la localización del usuario de sistemas GNSS se basa en la triangulación de su posición basándose en las señales que este recibe de los 4 satélites operativos más cercanos, cuyas coordenadas espaciales son conocidas. La solución de este problema geométrico se obtiene con la ayuda de los datos de navegación provenientes de las señales únicas que cada uno de los satélites envía. Además, con esa señal es posible determinar la distancia a la que se encuentran los satélites del receptor. Así, se puede obtener la posición del usuario con una precisión de varios metros e incluso centimétrica si se empleasen técnicas diferenciales. Se ha de tener en cuenta la recepción de otra señal procedente de un cuarto satélite necesario para subsanar los errores referentes a la diferencia de tiempos entre los satélites y el usuario, lo cual amplía la precisión del cálculo.

Sin embargo, existen otras fuentes de error en el proceso de obtención de la posición mediante los sistemas GNSS. Uno de ellos es el error de posición introducido por la posición relativa entre los 3 satélites que se usan en la triangulación, esto se debe al GDOP, en el cual los mayores errores se producen cuando los satélites se encuentran muy cerca entre ellos dando lugar a ángulos más pequeños. Asimismo, se pueden obtener también errores debidos a las efemérides, ya que en algunas ocasiones el satélite sufre variaciones en la trayectoria de su órbita debido a las acciones gravitatorias del sol y la luna.

Por otra parte, se observan también errores debidos a las variaciones en distintos parámetros tanto de la ionosfera como la troposfera, como pueden ser cambios de densidad. Otro error conocido es el posible malfuncionamiento de los relojes atómicos que usan los satélites. Y, finalmente, se ha dado el caso de introducir errores de manera

deliberada, como es el caso de la Disponibilidad Selectiva (SA, *Selective Availability*), introducido por el gobierno de los Estados Unidos en el GPS, dejando solo con la más alta precisión al departamento militar del estado. Este fenómeno se detuvo en el año 2000.

Los sistemas GNSS tienen tres partes principales a diferenciar: el segmento espacial, es decir, los satélites; el segmento de control: también conocido como segmento de tierra, se encarga de verificar la operación correcta del sistema; y el segmento de usuario: compuesto por los receptores que ejecutan los cálculos y proporcionan los resultados finales [2]:

- Segmento espacial: se trata del conjunto de los satélites, cuya función es generar los códigos que se transportarán en las señales portadoras que estos han de transmitir. Cuentan con relojes atómicos de muy alta estabilidad y precisión. Además, han de tener la cualidad de estar diseñados de tal forma que desde cualquier punto de la Tierra se puedan observar como mínimo 4 satélites.
- Segmento de control: es la parte logística del sistema GNSS ubicada en la superficie de la Tierra. Su función es revisar y mantener el correcto funcionamiento de la red, haciendo uso de las predicciones y estimaciones tanto de la evolución de las efemérides como de los relojes satelitales. También se encarga de la actualización de los mensajes de navegación definidos para cada uno de los satélites.
- Segmento de usuario: se trata del segmento donde se obtienen los resultados a partir de la obtención de las señales y el posterior cálculo de la posición. Este segmento se compone de todos los receptores GNSS capaces de recibir las señales de los satélites.

Otra parte importante de los sistemas GNSS son los sistemas de coordenadas en los que se referencian. El sistema WGS 84 (World Geodetic System 84) es el sistema considerado como el estándar a nivel mundial, pero no es el usado por todos los sistemas GNSS. GLONASS utiliza el sistema PZ-90 (Parametry Zemli 1990 goda); Galileo, en cambio, se referencia a partir del GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame); y BeiDou emplea el sistema CGC2000 (Geodetic Coordinate System 2000). A pesar de que cada uno de los sistemas GNSS utiliza un sistema de coordenadas diferente, estos pueden ser referenciados entre ellos a partir de ciertas transformaciones. Por otra parte, el sistema de referencia oficial en España es el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), que es compatible con el sistema WGS 84 [2].

A continuación, se pasa a exponer con detalle los sistemas GNSS existentes y sus diferencias principales con el fin de describir ciertas nociones que tienen gran relación con lo trabajado posteriormente en este trabajo.

1.1 GPS

El GPS es un sistema GNSS compuesto por 24 satélites colocados de tal manera que como mínimo 4 de ellos sean accesibles para el receptor desde cualquier punto de la superficie terrestre. Con tal fin, estos satélites están situados a una distancia de 19300 kilómetros por encima de la superficie terrestre y se mueven con una velocidad de 11200 kilómetros por hora, lo que produce que orbiten alrededor de la Tierra cada 12 horas. Este sistema es actualmente propiedad de la Fuerza Espacial de los Estados Unidos [3].

Como es lógico, para conseguir el correcto funcionamiento de un sistema como el GPS se ha habido de llevar a cabo una gran cantidad de proyectos de diversos resultados en busca de mejoras continuamente. El primer sistema que precedió al sistema GPS es el sistema TRANSIT. La creación de este sistema vino dada por los avances tecnológicos rusos, al conseguir lanzar el satélite Sputnik en el año 1957. Con el fin de alcanzar y superar los avances desarrollados por el gobierno ruso, Dr. Dick Kershner lideró la creación del proyecto Transit, que consistía en el lanzamiento del satélite homónimo en el año 1960 con operatividad plena para el año 1964. Gracias a este programa, se mejoró en gran medida la precisión, al usar dos frecuencias portadoras para dar forma al retraso temporal sufrido por las señales en la ionosfera.

Con el paso del tiempo, más avances fueron desarrollándose. En el año 1962, se puso en marcha el programa 621B. El fin de este programa, llevado a cabo entre los años 1966 y 1972, era solucionar aspectos relacionados con las frecuencias y técnicas de modulación de las señales portadoras de los satélites. Finalmente, con la resolución del programa se llegó a ciertas conclusiones: la primera fue que la modulación CDMA (Code Division Multiple Access), también conocidas como PRN (Pseudorandom Noise), era la mejor de las técnicas de modulación para esta misión; también se concluyó que la frecuencia sería la misma para la totalidad de los satélites con la diferencia de que cada uno dispondría de su señal propia codificada; además, de la mano del anterior punto, se determinó la forma en la que los siguientes satélites seleccionarían sus códigos para así no interferir de ninguna manera en los satélites ya dispuestos; y, por último, se ratificó que al usar 4 satélites en vez de tres únicamente, se podría prescindir de los más precisos relojes atómicos, lo cual suponía una gran ventaja [3].

Más adelante, en el año 1964 con Roger L. Easton Sr. al frente, se inició un segundo proyecto satelital con el nombre de *Timation*. Este nuevo programa trataba de adquirir nuevos avances con el uso de dos satélites experimentales, *Timation 1* y *Timation 2*. Contaban con relojes de cuarzo muy estables y eran capaces de sincronizarse con el usuario gracias al uso de una estructura de señal de alcance pasivo conocida como “de tono lateral”. Con ambos satélites en órbita, se llegaron a conseguir precisiones del orden de 200 pies en un punto determinado.

El verdadero inicio del actual sistema GPS data del 14 de diciembre de 1973, momento en el que la JPO (*Joint Program Office*) acuerda la aprobación del programa NAVSTAR GPS. Varios años más tarde el gobierno estadounidense empezó a elaborar ciertos contratos con el fin de comenzar el desarrollo de receptores GPS.

El lanzamiento de los satélites fue llevado a cabo por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, y se produjo entre los años 1989 y 1995, año en el que el último de los 27 satélites fue puesto en órbita, 24 operacionales y 3 de ellos, de repuesto. Durante años este servicio fue únicamente militar, hasta que en el año 1999 se empezó a comercializar con los primeros terminales con GPS activado. Durante ese año y parte del siguiente la calidad del sistema GPS era ciertamente pobre, debido a la Disponibilidad Selectiva (SA), comentada en puntos anteriores, pero a mitades del año 2000 esta fue desactivada.

Los 3 segmentos del sistema GPS son los siguientes:

- El primero de ellos es el segmento espacial, cuya función es la transmisión de las señales de radionavegación y almacenar y más tarde retransmitir el mensaje enviado desde el segmento de control. El sistema GPS se basa en una constelación dividida en 6 planos orbitales con una inclinación cada uno de ellos de 55 grados respecto al ecuador. Cada una de estas órbitas contiene como mínimo 4 satélites con el espacio suficiente para ser capaz de albergar uno más. Los 27 satélites del sistema, cuyas órbitas son casi circulares y de tipo MEO, tienen un periodo de 12 horas siderales y se encuentra a una altura de 20200 kilómetros sobre la superficie terrestre [4].
- El segmento terrestre, o de control, está compuesto por un entramado de estaciones de monitorización (MS, *Monitor Station*), una estación principal de control, también conocida como estación maestra (MCS, *Master Control Station*) y cuatro antenas de tierra (GA, *Ground Antennas*). Además, existe una segunda estación maestra en caso de que la original no funcione de la manera adecuada. El funcionamiento de este sector consiste en que las estaciones de monitorización reciben las señales de los satélites, de las cuales extraen las medidas y datos de importancia, entonces, estos datos son transmitidos a la estación maestra de control, donde se analizan y finalmente estiman las efemérides de cada uno de los satélites junto con los errores de los relojes. Una vez realizado este proceso, la estación maestra crea el mensaje de navegación que es enviado a las antenas de tierra que, en última instancia, estas transmiten a los satélites [5].
- En tercer lugar, el segmento de usuario, es la parte del sistema compuesta por los receptores y procesadores que reciben las señales GPS y con los datos extraídos resuelven su problema propio haciendo uso de las pseudodistancias para determinar su posición con la mayor precisión posible. Para poder determinar la posición de manera correcta, el mensaje de navegación ha de incluir los parámetros relacionados con el cómputo, como son las efemérides, los almanaques y los errores de reloj y el tiempo preciso [6].

Actualmente, el desarrollo del sistema GPS está tratando de modernizar el sistema a través de la creación de nuevas señales de navegación que puedan aportar un mejor funcionamiento al sistema. Pero para entender el problema de las señales de navegación resulta trascendental comprender como se comunican las diferentes partes

del sistema GPS. Lo principal que se ha de conocer es que la frecuencia nominal en que se generan las señales de los satélites es 10.23 MHz. Así, en esta frecuencia, emiten 3 señales diferenciadas: la portadora, el código y el mensaje [3].

La parte que se utiliza para resolver es el código, pero para poder descifrar este código se requiere de la portadora. La señal portadora es modulada de tal manera que se pueda obtener el mensaje establecido en el código de manera correcta y funcional. Hay dos códigos, el código P, utilizado únicamente en el entorno militar, y el código C/A (*Course/Acquisition*), de uso civil, que posibilita la determinación del tiempo invertido en el trayecto y, por lo tanto, la pseudodistancia. El código C/A es diferente en cada uno de los satélites para prevenir fallos de identificación.

Comprendido esto, se pasa a hablar de las nuevas señales de navegación. Pues bien, actualmente, la banda L1, con una frecuencia de 1575.42 MHz, se utiliza con el fin de transmitir los códigos C/A y P, al mismo tiempo, que la banda L2, de frecuencia 1227.60 MHz, se emplea única y exclusivamente para transportar código P, militar. Estas son las dos bandas que se encuentran completamente operativas hasta el momento [7] [8].

La incorporación de las nuevas señales de navegación es un proceso gradual que aún no se ha completado. Este proceso se está implementando a base de incluir la capacidad para estas señales en los nuevos satélites que pasan a formar parte de la constelación. Por el momento y con el fin de comprobar su efectividad, son de uso limitado. En la figura 1.1 se pueden observar los nuevos bloques de satélites que serán puestos en órbita en años posteriores:

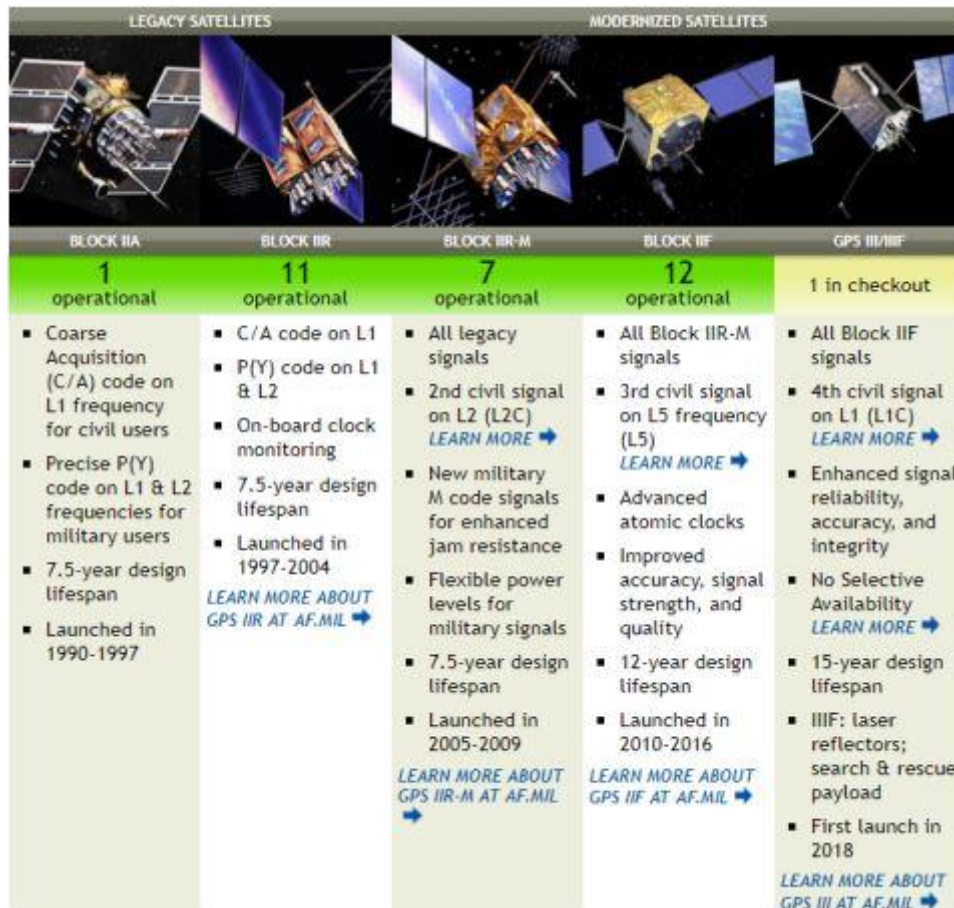


Figura 1.1: Programa de modernización de la constelación GPS [9]

Las nuevas señales que se han de incorporar a medida que avance el tiempo son las siguientes:

- Segunda señal civil L2C: actualmente es transmitida por 22 satélites GPS y fue está diseñada con fines comerciales. Su frecuencia es de 1227.60 MHz, al igual que la banda L2 anterior. Se le incorpora una nueva señal militar, el código M, además del código P ya existente, pero sustituye el antiguo código C/A por el nuevo mensaje de navegación CNAV (*Civil Navigation*), el cual proporciona mejores funcionalidades, como son la mejoría en cuanto a los umbrales de rastreo y la tolerancia a interferencias, junto con una mayor estabilidad de la señal y la reducción de los errores provocados por el efecto *multipath* [8].
- Tercera señal civil L5: a fecha de mayo de 2021, se encuentra disponible en 15 de los satélites empleados en sistema GPS. La frecuencia de su banda es de 1176.45 MHz. Su principal propósito es el de proporcionar el servicio de *Safety of Life*. Sus características más destacables son un amplio ancho de banda, gran poder de transmisión y una señal con un diseño muy avanzado. Además, el único organismo con la capacidad de utilizar esta señal es la ARNS (Unión Internacional de Telecomunicaciones para Servicios de Radionavegación Aeronáutica) [8].

- Cuarta señal civil L1C: y se trata de una señal con el mismo fin que la L1 actual, pero con mucho mejor funcionamiento. Su frecuencia será de 1575.42 MHz, al igual que la L1 y utilizará la última tecnología y se estructurará de la misma manera que la señal L2C, con los códigos M y P. Cabe destacar que esta señal está siendo desarrollada de manera conjunta por la Unión Europea y los Estados Unidos con el fin de ambos sistemas, Galileo y GPS, puedan beneficiarse de la implementación de esta nueva señal.

1.2 GLONASS

En dirección contraria al lanzamiento del primer satélite, en el caso de los sistemas GNSS, Estados Unidos fue capaz de elaborar de manera más veloz que la URSS su sistema GNSS propio, el GPS. Es por ello que el segundo sistema de navegación basado en satélites operativo fue el GLONASS, el sistema GNSS elaborado por la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). En el transcurso del desarrollo de ambos proyectos se dieron una gran cantidad de diferencias en cuanto al diseño de estos sistemas. Las diferencias principales que se pueden observar por parte de GLONASS es, en primer lugar, el uso del sistema de referencia PZ-90, en discrepancia con el uso del WGS-84 por parte de los Estados Unidos. Además, en este sistema se utiliza la modulación FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) en lugar de la CDMA, como también se decidió usar cargas de satélites presurizadas [2].

Este sistema fue desarrollado por Roscosmos (*Russian Federal Space Agency*) y, de la misma manera que el GPS, se trata de un sistema global que ofrece servicios tanto civiles como militares. Una peculiaridad es que se incluye una interfaz con la cual la población soviética fuese capaz de desarrollar sus propios receptores GLONASS de uso civil. Además, cabe destacar que la Unión Soviética se decantó por situar estaciones de monitoreo únicamente en el territorio perteneciente a la URSS en el momento de su creación.

En cuanto a la historia de este sistema, se puede decir que se asemeja bastante a la historia del sistema GPS, pero con unos años de diferencia. Entre los años 1983 y 1995, los 24 satélites previstos para este sistema fueron puestos en órbita. Sin embargo, en el año 1988, con un sistema no plenamente operativo, la URSS comenzó a ofrecer el servicio a la población civil sin ningún tipo de cargos. Esto supuso un punto de inflexión ya que, a pesar de que el sistema GPS estaba más desarrollado, este contaba con la Disponibilidad Selectiva y, por lo tanto, el servicio ofrecido por Estados Unidos era de peor calidad. De tal manera, la popularidad del sistema GLONASS se vio incrementada en gran medida durante esos años.

Más adelante, y debido al paso de los años y al mal momento en la economía soviética, la calidad del sistema GLONASS comenzó a disminuir debido a la corta vida útil de ciertos satélites. Es por ello que, desde el año 2003, la constelación de satélites del sistema está siendo renovada haciendo uso de los nuevos satélites GLONASS-M, cuyos relojes eran de mayor calidad y su vida útil mucho más amplia. En ese momento,

la señal generada se transmitiría gracias a dos frecuencias portadoras, permitiendo que los errores ionosféricos pudiesen ser resueltos. Por otra parte, en el año 2006, se comenzó un proceso comandado por el gobierno ruso en el cual se pasaba a modernizar el sistema con el fin de volver a la plena operatividad anterior y desde ese mismo año la cantidad de satélites en órbita ha sido casi todo el tiempo de 24, excepto algunos cortos periodos de excepción. Cabe mencionar que, en abril del año 2014, una serie de problemas introducidos en las efemérides fueron detectados, lo cual ha producido una cierta desconfianza en este servicio por parte de muchos usuarios [2].

El sistema GLONASS, de igual manera que el GPS, está compuesto por 3 segmentos:

- Segmento espacial: en estado operacional total, se compone de 24 satélites, más 3 de repuesto, situados en órbitas de tipo MEO y circulares ubicadas a 19100 kilómetros de elevación y con un periodo orbital del orden de 11 horas y 15 minutos. La constelación se divide en 3 planos a 45 grados entre ellos y con 8 satélites por cada uno de esos planos. Cuenta con una inclinación mucho mayor que el sistema GPS, por lo que da cobertura sin problema a zonas con latitudes muy altas.
- Segmento terrestre: su composición es muy parecida al del GPS. Está compuesto por un centro principal donde se controla la constelación y se gestionan los satélites: el SCC (*System Control Centre*); se compone también de 5 centro Telemetría, Seguimiento y Comando (TT&C: *Telemetry, Tracking and Control*), donde se realiza el seguimiento de los satélites; por otra parte, también se encuentra en este segmento las 2 SLR (*Satellite Laser Ranging*) y 4 MS (*Monitoring and Measuring Station*), que se encargan de la determinación de los parámetros de las efemérides; finalmente, se dispone también de 6 estaciones MS adicionales que comenzarán a estar operativas en los próximos años.
- Segmento de usuario: siguen el mismo funcionamiento que en el sistema GPS, componiéndose de receptores de las señales GLONASS tanto civiles como militares, los cuales generan a través de estas señales la determinación de la posición u otros datos relativos a este.

En la Tabla 1.1 se puede observar cómo se encuentra compuesto actualmente el propio sistema y el plan próximo para la constelación, dándose a conocer ciertos valores y parámetros que se explicarán a continuación.

Satellite series	Launch	Current status	Clock error	FDMA signals		CDMA signals		
				1602 + n×0.5625 MHz	1246 + n×0.4375 MHz	1600.995 MHz	1248.06 MHz	1202.025 MHz
GLONASS	1982–2005	Out of service	5×10^{-13}	L10F, L1SF	L2SF			
GLONASS-M	2003–	In service	1×10^{-13}	L10F, L1SF	L20F, L2SF	-	-	L30C ±
GLONASS-K1	2011–	In service	5×10^{-14} ... 1×10^{-13}	L10F, L1SF	L20F, L2SF	-	-	L30C
GLONASS-K2	2019–	Test satellite manufacturing	5×10^{-16} ... 5×10^{-14}	L10F, L1SF	L20F, L2SF	L10C, L1SC	L20C, L2SC	L30C
GLONASS-V	2023–2025	Design phase		-	-	L10C, L1SC	L20C, L2SC	L30C
GLONASS-KM	2030–	Research phase		L10F, L1SF	L20F, L2SF	L10C, L1SC	L20C, L2SC	L30C, L3SC

Tabla 1.1: Programa de modernización de GLONASS [10]

En el caso de GLONASS, de forma contraria al GPS, el código PRN es transmitido a diferentes frecuencias. Esto se debe a que estas señales no utilizan la modulación CDMA, sino la FDMA, es decir, multicanalización en frecuencia. Este método es usado por las señales que veremos más adelante, cuyo nombre termine en “F”, ya que existen otras señales dentro de este sistema que sí que utilizan la modulación CDMA, estas son las que su nombre acabe en “C” [2].

Pasando a explicar las diferentes señales, las bandas iniciales L1 y L2 constituyen las frecuencias portadoras, con diferentes códigos: la banda L1 se modula para código C/A y P, pero la banda L2 únicamente para P. Este rango creció en el año 2011, cuando se introdujo una tercera frecuencia, la L3, de forma CDMA. En los próximos años se producirá un aumento de la cantidad de señales que usen la modulación CDMA, dando lugar a las bandas L1SC y L2SC.

Finalmente, en cuanto a los servicios ofrecidos por el sistema GLONASS, cabe destacar que el único totalmente operativo es el de Precisión Estándar (SP), con fines civiles, se dispone del servicio de uso autorizado de Alta Precisión (CV) y también existe el servicio futuro de Búsqueda y Salvamento (SAR), que no está operativo por el momento.

1.3 Galileo

Galileo es el sistema GNSS creado por la Unión Europea y la ESA (*European Space Agency*). Este sistema surge de la necesidad de la Unión Europea de desarrollar una tecnología independiente de Estados Unidos y Rusia, para así poder disponer de ciertas garantías en cuanto a las prestaciones de los sistemas GNSS [2].

El desarrollo de este proyecto ha seguido tres fases bien diferenciadas: la fase IOV (*In-Orbit Validation*), que se basa en el estudio a través de varios satélites de las condiciones del entorno en órbitas MEO a base de medir y registrar las variaciones en cuanto a radiación y campo magnético, entre otros; la segunda fase es la IOC (*Initial*

Operational Capability), en la cual se inicia la puesta en marcha de los segmentos de tierra y espacial con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de las comunicaciones; y la última fase, la fase FOC (*Full Operational Capability*), se consigue en el momento en el que la constelación de 30 satélites es completada junto con los centros de control terrestres y las estaciones de comunicaciones pertinentes.

Actualmente, a día 27 de abril de 2021, este sistema se compone de 22 satélites operacionales, más otros 4 que no se encuentran en condiciones de formar parte de la constelación. Durante los próximos años está previsto que la fase FOC concluya y se disponga de los 30 satélites que se desean [11].

Como en los anteriores sistemas GNSS, Galileo se compone de 3 segmentos principales:

- Segmento espacial: es el encargado de la generación y retransmisión del código y de las señales portadoras, además del almacenamiento y emisión de los mensajes de navegación. En el momento en que todos los satélites previstos estén operativos, la constelación constará de 30 satélites ubicados en órbitas de tipo MEO con una altitud de 23222 kilómetros. Estos satélites estarán dispuestos en 3 órbitas, en las cuales se encontrarán 10 satélites por órbita, con uno de esos 10 con el fin de servir de repuesto en caso de fallo o avería en otro satélite. Cabe destacar el aumento de precisión que aporta al sistema el uso de relojes de hidrógeno y rubidio en los satélites [12].
- Segmento terrestre: este segmento es mucho más complejo que su relativo en los otros sistemas nombrados hasta el momento. Consiste de 2 GCC (*Galileo Control Centres*), encargados del control de la constelación; existe un único GCS (*Galileo Control Segment*), el cual se encarga de la monitorización de los satélites, además de la planificación y automatización de sus funciones; también se dispone de 6 estaciones TT&C, de las cuales se obtienen datos relativos al movimiento de los satélites; Galileo dispone también de una red de estaciones GSS (*Galileo Sensor Station*) para captar las señales de los satélites; además, encontramos también el GMS (*Galileo Mission Segment*), encargado de examinar la posición y tiempo de los satélites a través de sus mensajes; y, finalmente, se dispone también de 10 estaciones ULS (*Galileo Uplink Station*), usadas para la comunicación hacia los satélites.
- Segmento de usuario: este segmento, al igual que en anteriores sistemas, está compuesto por los distintos receptores que reciben las señales y a partir de ellas resuelven las ecuaciones de navegación y determinan su posición.

Por otra parte, la gran ventaja que ofrece el sistema Galileo por encima de los sistemas GPS y GLONASS es, sin lugar a duda, el gran número de servicios que ofrece, como son los siguientes:

- Servicio Abierto (*OS, Open Service*): cualquier usuario con un receptor puede acceder sin necesidad de autorización. Es capaz de ofrecer la posición del

receptor con una precisión menor que 1 metro, además de proporcionar velocidad y datos relacionados con el tiempo [2].

- Servicio Comercial (*CS, Commercial Service*): este servicio está reservado para aquellos usuarios que están dispuestos a pagar una cierta tasa. A cambio, los usuarios de este servicio reciben unos servicios de posicionamiento con una precisión inferior a 1 centímetro. Este servicio incluye una señal de navegación adicional que proporciona nueva información no disponible en el Servicio Abierto.
- Servicio Público Regulado (*PRS, Public Regulated Service*): este servicio es proporcionado a todos aquellos usuarios que dispongan de una autorización del gobierno en cuestión. Estos usuarios deben demostrar que requieren, debido a su posición, unas condiciones de servicio muy buenas en cuanto a continuidad y precisión. Este servicio, a diferencia de los anteriores, no es interoperable con el GPS, ya que se requiere que sea seguro con señales independientes y una encriptación fuerte.
- Servicio de Búsqueda y Rescate (*SAR, Search and Rescue Service*): este servicio no se utiliza directamente por el usuario, sino que se pone en marcha en situaciones determinadas las cuales requieren de un servicio excelente, ya que necesitan de urgencia y precisión.
- *Safety of Life (SoL)*: servicio con gran integridad y precisión usado en aplicaciones del entorno de los transportes, donde la criticidad del servicio es muy alta.

Para ofrecer todos estos servicios, Galileo hace uso de 3 señales diferentes. En la figura siguiente, Figura 1.2, se observa el espectro de señales usadas por este sistema, así como su relación con los distintos servicios y las modulaciones puestas en uso.

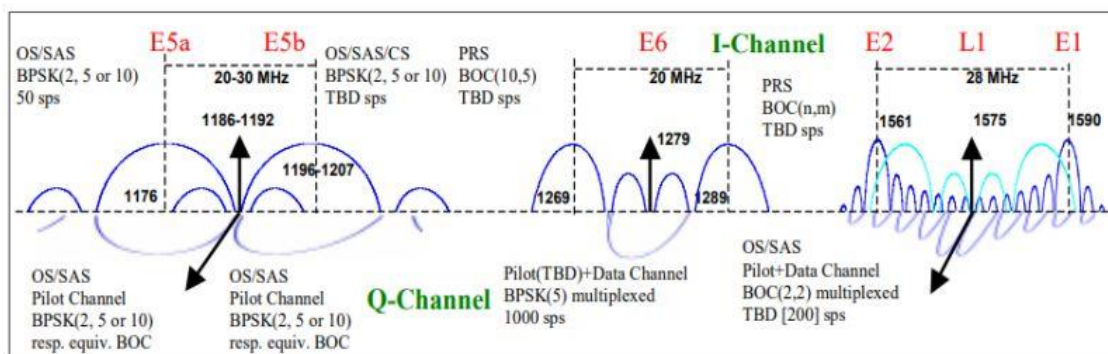


Figura 1.2: Espectro de frecuencias de Galileo [13]

Galileo, como se observa, transmite a través de las señales E1 (-L1-E2), E5a, E5b y E6. Las señales E1, L1 y E2, agrupables en una misma banda, a través de códigos PRN, proporcionan mensajes tanto de navegación como de integridad para así ofrecer los servicios OS y PRS. Su frecuencia es de 1575.42 MHz. Por otra parte, la señal E6, con

una frecuencia de 1278.75 MHz, usa códigos PRN y ofrece los servicios PRS y CS. Y, por último, la señal E5 es posible dividirla en 2 señales, la E5a, con frecuencia de 1176.45 MHz, con servicios OS y CS, y la señal E5b, con una frecuencia de 1191.795 MHz, que proporciona los servicios OS, CS y SoL.

1.4 BeiDou

BeiDou es el sistema de navegación basado en satélites desarrollado por China. Es también conocido como BeiDou-2, ya que este sistema global fue en un primer momento un sistema regional que únicamente proporcionaba cobertura a las regiones del Pacífico y la región de Asia. En el año 2011, el sistema alcanzó la operatividad de forma regional para estas zonas, y desde ese momento se está trabajando para conseguir que BeiDou adquiera un funcionamiento global que dé cobertura en toda la superficie de la Tierra. Este sistema utiliza su propio sistema de coordenadas, el CGCS2000 [2].

Su arquitectura se compone de 3 segmentos:

- Segmento espacial: como se ha comentado, aún se encuentra en fase de desarrollo, pero la cantidad de satélites total que se pretende poner en órbita es de 35, contando entre ellos con 5 satélites de tipo GEO, orbitando a una altura de 42163.9 kilómetros, 27 satélites de tipo MEO, con una altitud de 21500 kilómetros, y 3 satélites IGSO, situados a una altitud de 36000 kilómetros.
- Segmento terrestre: este segmento está dispuesto de manera similar a los sistemas GPS y GLONASS, contando con su estación principal, la *Master Control Station*, responsable de la gestión y control del conjunto de satélites; cuenta también, por el momento, de dos *Upload Stations*, desde las cuales se envían los mensajes a los satélites desde la Tierra; y una red de 10 *Monitor Stations*, en las que se reciben las señales de los satélites y se extrae información de estas para así monitorizar y registrar el funcionamiento de la constelación.
- Segmento de usuario: al igual que en los sistemas GNSS analizados anteriormente, este segmento lo conforman los receptores terrestres que se encargan de procesar la información recibidas desde los satélites para obtener así tanto su localización como detalles temporales y de velocidad.

Debido a los cambios en el diseño y estructura del sistema BeiDou, este será capaz de ofrecer servicios tanto globales, como regionales. Los servicios a nivel global son los siguientes:

- Servicio Abierto: su funcionamiento es similar a su servicio relativo en los sistemas GPS y Galileo, ofreciendo una precisión de entorno a los 10 metros en cuanto a la determinación de la posición.

- Servicio Autorizado: al igual que en el sistema Galileo, este servicio está reservado para situaciones excepcionales y confiere una mejora en relación a la precisión e integridad del sistema.

Por otra parte, a nivel regional se encuentran los siguientes servicios:

- Servicios diferenciales de área extensa: se prevé que sus servicios mejoren a medida que más satélites son puestos en órbita. En ese momento, se espera que su precisión alcance a niveles de 1 metro.
- Servicios de mensajes cortos (informes de posicionamiento): es el servicio que facilita la comunicación entre los usuarios y las estaciones a través de mensajes con informes de posicionamiento.

1.5 IRNSS o NAVIC

El quinto de los sistemas GNSS explicados es el IRNSS (Sistema Regional Indio de Navegación por Satélite), el cual fue desarrollado por el gobierno indio a través del ISRO (*Indian Space Research Organization*). Se trata del primero de los sistemas explicados que es únicamente regional. El proceso de elaboración de este sistema comenzó en 2006 y finalizó en 2016 con el lanzamiento de su último satélite. Los lanzamientos han tenido lugar desde julio de 2013, con el lanzamiento de su primer satélite, hasta abril de 2016, momento en que este último satélite fue puesto en órbita. El área de cobertura del sistema IRNSS es la totalidad del área de la región de la India, junto con una superficie de 1500 kilómetros a su alrededor. Al completarse el lanzamiento del último satélite, se decidió que el sistema pasase a llamarse NAVIC [14].

Al igual que en los sistemas anteriores, este sistema se divide en 3 segmentos:

- Segmento espacial: dado que es regional, este sistema cuenta con un menor número de satélites. Se compone de 7 satélites, 3 de tipo GEO, y 4 de tipo IGSO, situados a una altitud de 24000 kilómetros sobre la superficie de la Tierra.
- Segmento terrestre: el segmento terrestre es bastante complejo contando en su estructura con una gran cantidad de centros específicos: como eje principal se encuentra el SCC (*Space Craft Control Centre*), encargado del control de la constelación; el INC (*IRNSS Navigation Center*) se encarga del seguimiento de los satélites; una serie de estaciones encargadas de monitorizar los satélites (IRIMS); estaciones encargadas de las señales CDMA (IRCDR); una red de estaciones de medición laser (ILRS); un centro encargado del control del tiempo (IRNWT); y, finalmente, una estación encargada de la comunicación de los datos (IRDCN).
- Segmento de usuario: este segmento, como acostumbra, está compuesto por los diversos receptores terrestres que se encargan de resolver las ecuaciones de navegación para así poder encontrar su posicionamiento y datos relativos a él.

En relación a su carácter regional, el sistema IRNSS o NAVIC solo proporciona dos servicios, uno de uso gratuito, y otro autorizado. El primero de ellos es el SPS (*Special Positioning Service*), utilizable por todos los usuarios y que alcanza precisiones de entorno a los 20 metros en el área del Océano Índico, y menos de 10 metros en la superficie de la India y zonas cercanas a ella; y el segundo servicio es el PS (*Precision Service*), de uso exclusivo para aquellos usuarios que dispongan de autorización y requieran de un servicio más preciso y con mayor integridad. En cuanto a las bandas de frecuencia de este sistema, ambos servicios hacen uso de la banda S (2492.08 MHz) y la banda L5 (1176.45 MHz).

1.6 QZSS

El sistema QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) es el sistema GNSS perteneciente al gobierno de Japón. Este sistema fue desarrollado por la compañía ASBC (*Advanced Space Business Corporation*), pero, más adelante, en el año 2007, el desarrollo de este sistema pasó a manos del SPAC (*Satellite Positioning Research and Application Center*), quienes finalizaron los preparativos para la puesta en marcha del sistema QZSS. El plan comenzó con el lanzamiento de su primer satélite en el año 2010, con la intención de alcanzar la cifra de 7 satélites operativos para lograr su objetivo final. Por el momento, solo 4 de estos 7 están en órbita [2].

De la misma forma que los demás sistemas GNSS, el sistema QZSS se compone por 3 segmentos:

- Segmento espacial: actualmente está compuesto por 4 satélites, 1 de ellos en órbita GEO, y los otros 3, en órbitas de tipo HEO, a una altitud de entre 32000 y 40000 kilómetros. El sistema es conocido también como “*quasi-zenith*” por el hecho de que uno de sus satélites en órbita HEO se encuentra durante gran parte del día alrededor de la posición del zenit de Japón.
- Segmento terrestre: este segmento terrestre tiene un diseño bastante común, disponiendo de la MCS (*Master Control Station*), donde se gestiona la constelación; una red de estaciones TT&C, con el fin de realizar el seguimiento de los satélites; un conjunto de estaciones de medición laser y una agrupación de 10 estaciones destinadas al monitoreo de los satélites.
- Segmento de usuario: este segmento, al igual que en los anteriores sistemas GNSS, lo componen los receptores terrestres encargados de recibir las señales y determinar los parámetros relevantes del usuario, como son la posición, la velocidad y datos relativos al tiempo.

En este sistema se hace uso de 6 señales diferentes, siendo 4 de estas usadas en conjunto con los demás sistemas GNSS existentes, estas son las señales L1C y L1C/A, con frecuencia de 1575.42 MHz, la L2C, a 1227.6 MHz, y la señales L5, disponible en la frecuencia de 1176.45 MHz; y, por otra parte, las 2 señales de frecuencia única del QZSS son la L1-SAIF, en una frecuencia de 1575.42 MHz,

destinada a servicios de aumentación, y la LEX, con fines experimentales, que es capaz de obtener precisiones entorno al centímetro, con una frecuencia de 1278.75 MHz.

En cuanto a los servicios ofrecidos por el sistema QZSS, podemos encontrar 5:

- Servicio de Posicionamiento por Satélite: con el fin de proporcionar servicio de posicionamiento en el área de cobertura.
- Servicio de Aumentación de Nivel Sub-Métrico: con entre 2 y 3 metros de precisión.
- Servicio de Aumentación de Nivel Centimétrico: capaz de ofrecer una precisión entorno a los 10 centímetros.
- Servicio de Verificación de la Tecnología Posicional: sirve como utilidad con el fin de demostrar las nuevas posibilidades que ofrece el sistema.
- Servicio de Entrega de Mensajes Cortos: está destinado a su uso por parte de usuarios que se encuentren en situaciones extremas con necesidad de una veloz respuesta.

Capítulo 2

Sistemas de Aumentación

Una vez comentados los sistemas de navegación basados en satélites, es momento de tratar los sistemas de aumentación. Estos sistemas nacen de la necesidad de crear un tipo de sistemas que ofrezcan garantías continuas de su operatividad, ya que los sistemas GNSS, debido a su naturaleza militar, no ofrecen esta seguridad.

Este tipo de sistemas se emplean para incrementar las prestaciones ofrecidas por los sistemas GNSS, gracias a una serie de cálculos y correcciones realizadas sobre las señales recibidas, haciendo uso de datos independientes de las señales de los sistemas GNSS.

La OACI contempla como sistemas de aumentación 4 sistemas distintos: el ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*), que usa datos procedentes de la propia aeronave; el SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*), en el cual se emplea una serie de nuevos satélites que ofrecen a posibilidad de realizar la corrección diferencial de los resultados; el GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), que de manera similar realizar correcciones diferenciales con datos recibidos del entorno terrestre cercano al aeródromo; y el GRAS (*Ground-Based Regional Augmentation System*), el cual tiene un diseño similar al GBAS, pero que nunca ha sido puesto en funcionamiento [15].

A lo largo de este capítulo se pasa a desarrollar el diseño y funcionamiento de los diferentes sistemas de aumentación junto con el estudio de las prestaciones que pueden ofrecer.

2.1 ABAS

El Sistema de Aumentación Basado en la Aeronave utiliza parámetros obtenidos por la aeronave para así aumentar la información disponible de tal manera que se mejoren los servicios prestados únicamente por el sistema GNSS en uso. Usando este tipo de sistema de aumentación, es posible realizar procedimientos de aproximación de no precisión y rutas tanto domésticas como oceánicas [15].

El funcionamiento de este sistema se basa en los dispositivos conocidos como RAIM (Vigilancia Autónoma de la Integridad en el Receptor), los cuales, a partir del uso de 5 satélites son capaces de estimar si alguno de ellos está actuando de manera defectuosa. Pero esto no es suficiente para ser un sistema de navegación pleno. Para pasar a serlo, se requiere de la característica conocida como Detección y Exclusión de Satélites (FDE), la cual es la encargada de, una vez advertido el defecto provocado por uno de los satélites, identificar cuál de los satélites empleados es el defectuoso, y

detener el uso de los datos proporcionados por este satélite. Para poder hacer uso del servicio FDE se han de obtener las señales de 6 satélites. Con estos servicios activos, la integridad del sistema de navegación pasa a ser mucho mayor.

2.2 GBAS

El Sistema de Aumentación Basado en Tierra utiliza receptores terrestres colocados en puntos concretos, con el fin de proporcionar una mayor integridad en entornos críticos, como son las áreas cercanas a los aeródromos. Usando este sistema se pueden realizar aproximaciones de hasta Categoría III, junto con todo tipo de operaciones terrestres además de despegues y aterrizajes. El sistema tiene como fin la mejoría de la integridad en estos entornos, pero es destacable el aumento de la precisión ofrecida, llegando a valores por debajo del metro.

Este sistema se compone de una serie de antenas que reciben las señales de los satélites y, haciendo uso de estas, calculan las correcciones para cada uno de los satélites visibles. Una vez realizado este cálculo, los valores de las correcciones son transmitidos a través del servicio de Transmisión de Datos de Muy Alta Frecuencia (VDB), los cuales son recibidos por las aeronaves que los requieran y, junto con los datos obtenidos del sistema GNSS, mejoran sus prestaciones para así poder realizar operaciones con una mayor integridad y precisión.

2.3 SBAS

El Sistema de Aumentación Basado en Satélites ofrece una mejora de las prestaciones de navegación utilizando una serie de nuevos satélites geoestacionarios, junto con una compleja red de receptores en la superficie terrestre. Haciendo uso de este sistema se pueden llegar a realizar aproximaciones APV, además de cualquier operación RNAV, debido a su alta disponibilidad.

El funcionamiento de este sistema tiene un procedimiento determinado: en primer lugar, se reciben los mensajes satelitales por parte de las estaciones terrestres de monitoreo; estas estaciones suministran estos datos a las estaciones maestras, lugar donde se analizan y procesan los datos, para finalmente generar las correcciones que más tarde habrá que hacer llegar al usuario; los mensajes con las correcciones se pasan a otro tipo de estaciones terrestres, las de enlace ascendente, donde se generan las señales que se envían a los satélites propios del sistema SBAS; y, en último lugar, una vez recibidos los mensajes en los satélites geoestacionarios, estos actúan como vínculo con el usuario final, que simplemente ha de recibir la información proporcionada por estos satélites, con información detallada de las correcciones a realizar.

Más adelante, en el siguiente capítulo, se tratarán con más detalle los sistemas SBAS.

2.4 Requerimientos

Los requerimientos establecidos son fundamentales para evaluar el funcionamiento de cada uno de los sistemas. Es por ello que se definen 4 parámetros que consolidan el estudio de los sistemas. Cada uno de estos parámetros son de gran importancia denominándose precisión al error que se halla en la solución, la disponibilidad expresa el grado en que el sistema está disponible a lo largo del tiempo, la integridad es el tercero de los parámetros e indica la capacidad del sistema de proporcionar valores fiables y ofrecer alertas para casos contrarios y, por último, la continuidad, que expresa el nivel de confianza en el que el sistema actúa sin sufrir interrupciones. Estas se explican con mayor detalle a continuación [16].

2.4.1 Precisión

Se trata de la característica más sencilla de entender y es entendida como la diferencia entre la posición real y la posición estimada por el sistema y se estima haciendo uso de métodos estadísticos para expresarla. Dicho de otro modo, este parámetro es el responsable de evaluar el nivel de correspondencia que ofrece el sistema para los valores tanto de posición, como de velocidad, como de temporización [17].

Para realizar el estudio de la precisión existen un gran número de distribuciones de la probabilidad que se pueden adaptar a los requerimientos de este análisis. El fin es que exista un valor probabilístico el cual no se haya de superar para cumplir el requisito de la precisión. De forma recurrente se usa el conocido como percentil 95, por el cual el 95% de las medidas obtenidas han de colocarse por debajo de este valor, aunque dependiendo del contexto se suelen usar de igual manera los percentiles 99 o 50. Por otra parte, también es común la asunción de una distribución normal en la cual dependiendo de la varianza se estime un percentil u otro, siendo 68 y 63, los más comunes.

2.4.2 Integridad

La integridad es el parámetro que estima lo fiable que es una medida, es decir, proporciona información acerca de la exactitud de los datos recibidos. Además, se incluye dentro de este parámetro la capacidad del sistema de ofrecer alertas en tiempo real en aquellos momentos en los que el sistema contenga algún tipo de defecto y no sea recomendable su uso [17].

En el campo en el que se desarrolla este trabajo, la aviación civil, los niveles de integridad que deben proporcionar estos sistemas suelen moverse en valores entre 99.999% y 99.9999999%, con el fin de proporcionar un servicio extremadamente fiable.

Este parámetro pasa a ser el responsable de la detección de los fallos en satélites o en algún otro punto del proceso de los sistemas. Este parámetro a su vez se basa en 4 conceptos que resultan imprescindibles para comprender de manera precisa la esencia del mismo:

- Límite de Alerta (AL, *Alert Limit*): se trata del valor límite en la tolerancia del error obtenido en las medidas de un cierto parámetro. Al superarse se dice que existe un fallo de integridad y se ha de emitir una alerta de manera inmediata. Se divide en Límite de Alerta Vertical (VAL) y Límite de Alerta Horizontal (HAL), y el sobrepaso de cualquiera de ellos implica el fallo de integridad ya mencionado.
- Tiempo de Alerta (TTA, *Time To Alert*): se trata del tiempo en el cual se tiene que dar el fallo de integridad para que este sea considerado como tal. Es decir, es posible sobrepasar el límite de alerta durante un periodo de tiempo inferior al TTA.
- Riesgo de Integridad (IR, *Integrity Risk*): constituye la posibilidad de que el error de posición (PE) sea superior al AL, sin que esto se vea reflejado en los datos realmente, debido a la inexactitud de la información registrada y, por lo tanto, el fallo de integridad no sea comunicado. No se encuentra definido de manera estándar.
- Nivel de protección (PL, *Protection Level*): estadístico que ofrece la información de manera numérica relacionada con la probabilidad de que el error de posición sea inferior al valor correspondiente al riesgo de integridad. Se compone por el Nivel de Protección Vertical (VPL), y el Nivel de Protección Horizontal (HPL).

Una vez establecidos los conceptos relativos a la integridad, es el momento de dar paso a las herramientas más usadas a la hora de estudiar la integridad de los sistemas. En primer lugar, hablamos del Índice de Seguridad como la relación entre el error de posición del sistema y su nivel de protección. El cociente resultante de esta relación expresa la seguridad de la operación, siendo un Índice de Seguridad mayor que 1 muestra de que el sistema no es seguro.

En segundo lugar, encontramos el Diagrama de Stanford, en el cual el error de posición se halla colocado en el eje de abscisas, y el nivel de protección en el de coordenadas. Además, en cada uno de los ejes del gráfico se sitúa el valor del nivel de alerta, dividiendo el sistema en 4 sectores. Al mismo tiempo, se traza la diagonal que expresa la igualdad del nivel de protección y el error de posición, dejando finalmente el diagrama dividido en 6 zonas.

Es importante destacar el hecho de que este diagrama no se aplica a los fallos de integridad, sino únicamente a los eventos de integridad, que son aquellos eventos en los cuales el fallo de integridad existe, pero no supera en duración al tiempo de alarma.

A continuación, se puede observar un Diagrama de Stanford y la diferenciación entre las zonas que lo componen, usando una gama de colores en la cual el color rojo es el de mayor peligro asociado.

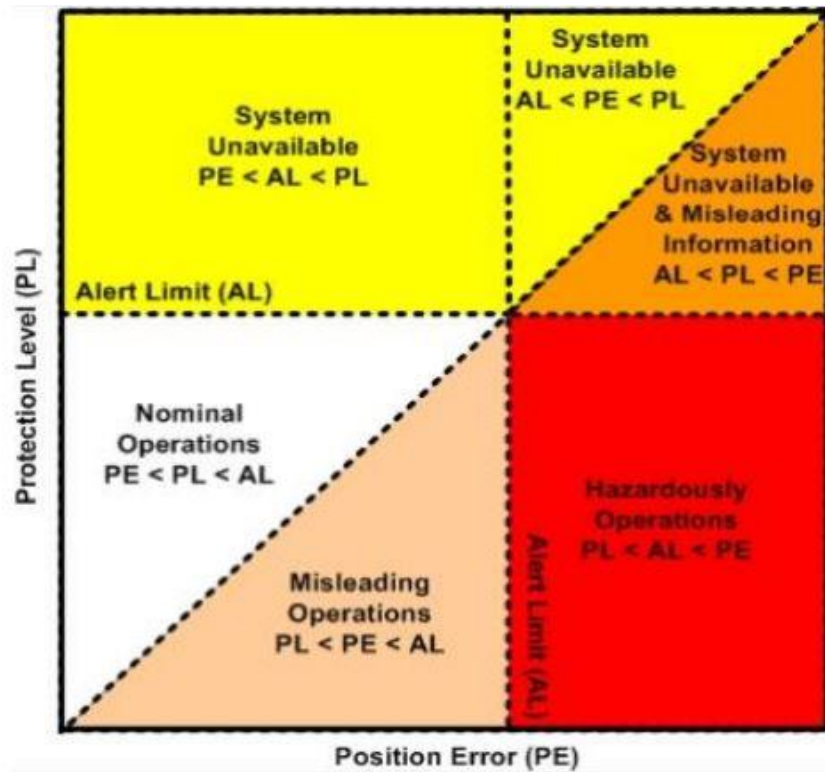


Figura 2.1: Diagrama de Stanford [17]

Recordando que la diagonal constituye la línea en la que el error de posición y el nivel de protección son iguales, quedan 2 regiones delimitadas, y en cada una de ellas, otras 3 zonas. Pues bien, para exponer cada una de las situaciones posibles comenzamos por la región en la cual el error de posición es menor que el nivel de protección, es decir, la parte a la izquierda de la diagonal. Por una parte, la zona de color blanco ($PE < PL < AL$) expresa que se el sistema se encuentra en Operaciones Nominales, es decir, que todo funciona correctamente; por otra parte, las zonas amarillas ($PE < AL < PL$ y $AL < PE < PL$) corresponden al caso en el cual el nivel de protección es mayor que el límite de alerta y, por lo tanto, el sistema deja de estar disponible por el hecho de no poder garantizar las operaciones.

Pasando al lado derecho de la diagonal, encontramos otros 3 casos, todos ellos con un error de posición superior al nivel de protección, es decir, sin proporcionar integridad: la primera zona, la de color cercano al *beige*, ($PL < PE < AL$) expresa que el sistema está ofreciendo información con una alta probabilidad de ser engañosa o errónea; en el área de color naranja ($AL < PL < PE$) el sistema seguiría emitiendo información poco fiable, pero no se encontraría disponible por el hecho de que el nivel de protección sería mayor que el límite de alerta, y el sistema sería consciente de su baja integridad; y, por último, la zona de color rojo ($PL < AL < PE$) constituye la situación de mayor peligro, ya que el sistema continuaría funcionando, ya que el nivel de protección no supera el límite de alerta, pero el error de posición sí que sería superior a este, lo que supondría la aceptación de una información errónea sin que el sistema detecte el fallo.

2.4.3 Disponibilidad

La disponibilidad se entiende como la cantidad de tiempo durante el que es posible para el receptor acceder a los servicios suministrados por el sistema. Técnicamente, este parámetro indica la capacidad que tiene un sistema para proporcionar sus servicios a lo largo del tiempo [17].

La disponibilidad está ampliamente relacionada con la integridad, ya que, si el sistema dispone de integridad, también dispone de disponibilidad, pero no al contrario. Cabe recordar que, para que el sistema esté disponible debe disponer de las señales de 4 satélites que funcionen en condiciones correctas, para así poder ofrecer la posición, velocidad y tiempo del dispositivo receptor.

2.4.4 Continuidad

La continuidad se entiende como la probabilidad de un sistema de dar un servicio continuado sin interrupciones durante el periodo de tiempo correspondiente a una operación determinada. Para ello, los cuatro parámetros que caracterizan al sistema han de permanecer dentro de un funcionamiento estable y seguro durante el tiempo que corresponda [17].

La manera más común de expresar la continuidad es mediante porcentajes. Estos porcentajes se relacionan con valores concretos de tiempo para así dar un valor a esta medida. Los términos más usados a la hora de medir la continuidad es el %/h o el %/15s, referidos cada uno de ellos a la probabilidad de que el sistema opere en perfectas condiciones durante o bien una hora, o bien 15 segundos, variando dependiendo del tipo de operación que se esté o se tenga previsto realizar.

Por otra parte, el SPS (*Standard Positioning Service*), estándar utilizado por el sistema GPS, introduce las definiciones de 4 tipos de fallos causantes de la falta de continuidad en un sistema:

- Fallos Graves (*Hard Failures*): estos fallos supondrían la no emisión de los mensajes del satélite bien sea de manera inmediata o de manera gradual, de modo que el satélite cada vez emitiese la señal de peor manera hasta llegar a ser inutilizable.

De igual manera, estos fallos se pueden dividir en dos subtipos: los fallos a largo plazo, que constituirían la inutilización total del satélite; y los fallos a corto plazo, que provocarían que el funcionamiento del satélite cesase durante un cierto periodo de tiempo, pero mediante técnicas de control o configuración, estos satélites podrían volver a estar operativos.

- Fallos por Desgaste (*Wear-Out Failures*): son fallos muy fácilmente previsibles, ya que existen modelos de gran exactitud que estiman la vida de cada uno de los componentes del satélite, por lo tanto, este tipo de fallos de continuidad, se

evitarían casi en la totalidad de los casos, al conocer la situación del satélite en cuestión.

Cabe la posibilidad de que estos fallos pasasen a ser fallos graves en el caso de que el Segmento de Control del sistema no fuese capaz de predecir de manera exacta el momento en que este fallo se va a producir, pero, sin embargo, resulta muy complicado, que esto suceda.

- Fallos Leves (*Soft Failures*): estos fallos no son directos, sino que vienen dados por una falta de integridad previa. En el momento en que la integridad falla, el satélite sigue estando disponible, pero mediante alertas y el análisis de los datos, el satélite puede pasar a considerarse no disponible debido a la baja calidad de sus datos.

Este tipo de fallos no tiene carácter predecible y por ello resulta fundamental la labor del satélite y de las estaciones de monitoreo ubicadas en la superficie para ser capaces de detectar este tipo de errores.

- Operaciones y Mantenimiento de Satélites (O&M): este fallo se da cuando alguna parte de los satélites requiere de un proceso de mantenimiento o reparación, como, por ejemplo, a la hora de comprobar el estado de los relojes atómicos existentes en los satélites. Estos fallos son fácilmente predecibles, ya que al igual que sucede con el desgaste de los satélites, existen modelos que, junto con la información proveniente de los propios satélites, permiten estimar los momentos en los que se dan estos acontecimientos.

Dado el carácter previsible de estos fallos, existe la posibilidad de que el propio Segmento de Control del sistema anuncie a los usuarios que ese satélite no se encontrará disponible durante un cierto periodo de tiempo. Incluso es posible, que este suceso sea controlado por el Segmento de Control, haciendo que estas acciones tomen lugar en los momentos en los cuales la falta de ese satélite pueda ser suplida por otro debido a la posición relativa de los demás satélites de la constelación.

Capítulo 3

SBAS

El sistema SBAS, Sistema de Aumentación Basado en Satélites, como se ha introducido en el capítulo anterior, es el sistema de aumentación que utiliza satélites geoestacionarios para transmitir la información de aumentación a los usuarios de los sistemas GNSS, habiendo sido previamente procesados y analizados en las estaciones terrestres que forman parte de este sistema. Con este sistema se puede dar servicio a diferentes áreas, ofreciéndose incluso a zonas extensas, gracias a su amplia disponibilidad. Los mensajes transmitidos por los sistemas SBAS proporcionan la información en forma de un mensaje SIS (*SBAS Signal-In-Space*), del cual se extraen los datos finales, como son las correcciones que se han de aplicar en cuanto a errores de posición, de reloj, ionosféricos y demás, y la información sobre las prestaciones del sistema. Además, también se ofrece información precisa relativa a la disponibilidad e integridad mediante el GIC (*GNSS/Ground Integrity Channel*), en el cual se dispone del estado de la disponibilidad de los distintos satélites de las constelaciones [18].

Por otra parte, los satélites GEO de los sistemas SBAS también están equipados para transmitir señales propias de los sistemas GNSS, con el fin de ofrecer una constelación de satélites disponibles más extensa que ofrezca mejores resultados a los usuarios.

Los sistemas SBAS se asemejan bastante a los sistemas GNSS. Sin embargo, su arquitectura, a pesar de contar con los 3 segmentos característicos de los sistemas de navegación basados en satélites, cuenta también con un cuarto segmento relativo al soporte de la misión [18]:

- Segmento espacial: está compuesto por uno a varios satélites de carácter geoestacionario con la función principal de retransmitir el mensaje recibido desde el segmento terrestre hacia los usuarios finales de este sistema. El mecanismo que emplean para esta función consiste en la recepción del mensaje a través de la banda C de frecuencia y convertirlo a una frecuencia dentro de la banda L en la cual emiten la señal. Más allá de esta función, suelen poseer la capacidad de generar mensajes típicos de los sistemas GNSS, siendo el más común el propio de la señal L1.

Asimismo, algunos de estos satélites incorporan nuevas funcionalidades muy útiles dentro de este entorno, como son: la posibilidad de transmitir en la banda L5 y la posibilidad de modular completamente las señales que se reciben del segmento terrestre, tarea que normalmente es hecha por este segmento.

- Segmento de Misión de Tierra: se encarga del almacenamiento, procesado y transmisión de la información relativa a los satélites que forman parte de las constelaciones pertenecientes a los sistemas GNSS. Para cumplir con tales

funciones se compone de 4 partes principales: la Red de Estaciones de Monitoreo, donde de manera recursiva se almacena la información procedente de los satélites GNSS; el Centro de Facilidad para el Procesado, que es el punto al cual se transmiten los datos por parte de las Estaciones de Monitoreo y donde estos son analizados, procesados y, finalmente, enviados a la siguiente parte del proceso; el Centro de Control de los Satélites GEO, donde, a partir de los datos recibidos, se crean los mensajes que han de llegar a los satélites GEO y se les envía a los mismos; y, por último, la Capa de Comunicación, que está constituida por todos aquellos elementos que proporcionan la conexión entre las 3 partes anteriores.

- Segmento de Usuario: está compuesto por todos aquellos receptores que disponen de los medios para interpretar las señales provenientes de los sistemas de aumentación. Estos, después de obtener su posición y demás parámetros gracias a los sistemas GNSS, únicamente debe aplicar las correcciones obtenidas a través del sistema SBAS.

Cabe destacar que, para usar, por ejemplo, el servicio *Safety of Life*, los receptores que forman parte del segmento de usuario han de cumplir también con ciertas especificaciones que garanticen el uso seguro de este sistema.

- Segmento de Soporte a la Misión: es el encargado de proporcionar apoyo a los diferentes inconvenientes o interrupciones que puedan darse durante el servicio del sistema. No participa directamente en el servicio, sino que, a través de distintos mecanismos, mejora y otorga seguridad a este.

Con el fin de proporcionar este servicio, el Segmento de Soporte a la Misión hace uso de simuladores de datos para analizar y predecir el comportamiento del sistema; emplea también como herramienta distintos procedimientos de análisis de los 4 parámetros característicos del sistema: precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, explicados previamente; y se hace uso también de distintos tests concretos para verificar, validar o incluso certificar el funcionamiento del sistema en escenarios diversos.

La señal usada por estos satélites es la L1, accesible en una frecuencia de 1574.42 MHz, que se modula en forma bifásica (BPSK) y hace uso de códigos PRN. Estas y otras condiciones de los sistemas se explicarán más adelante entrando en detalle en cada uno de los sistemas SBAS que existen.

3.1 Fundamento matemático

A la hora de entender el funcionamiento de los sistemas SBAS junto con los sistemas de navegación basado en satélites, es cuando se da la situación conocida como Posicionamiento Diferencial (DGPS), en el cual se utilizan 2 receptores terrestres, uno fijo, de posición conocida, y uno móvil, del cual se quiere obtener la posición. En este proceso de obtención de la posición, el receptor fijo, conocedor de su posición con gran detalle, compara esta con la obtenida a partir de las pseudodistancias propias de los satélites, y descifra el error entre una y otra, obteniendo finalmente las correcciones

pertinentes a la variación de la distancia (RRC) y las correcciones relativas a las pseudodistancias (PRC). Una vez realizado este cálculo, estas correcciones son transmitidas al receptor móvil para que haga uso de ellas y obtenga una mayor precisión.

Existen diferentes tipos de pseudodistancias, pero, en este caso, se trabaja con pseudodistancias de código. De tal forma, dicha pseudodistancia para una estación denominada A, en una época t_0 , puede ser escrita de la manera siguiente [2]:

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

Donde:

$R_A^j \equiv$ pseudodistancia entre el satélite j y la estación A.

$\rho \equiv$ distancia geométrica entre el satélite y la estación.

$\Delta\rho \equiv$ valor relativo al error radial de la órbita y los efectos de la refracción tanto ionosférica como troposférica.

$\delta \equiv$ desviaciones de cada uno de los relojes del satélite y del receptor.

Posteriormente, la pseudodistancia se corrige de la forma siguiente:

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

Donde:

PRC \equiv correcciones de las pseudodistancias.

Más adelante, haciendo uso de varias medidas de las correcciones obtenidas a lo largo del tiempo, se pueden estimar las correcciones RRC.

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

Donde:

RRC \equiv correcciones de la variación de distancia.

De manera similar, se aplica la misma fórmula para la estación remota B:

$$R_B^j(t_0) = \rho_B^j(t_0) + \Delta\rho_B^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_B(t_0)$$

Se aplica la corrección de pseudodistancias obtenida previamente a la estación con nombre B:

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

De tal forma que los errores de satélites han terminado por desaparecer. Ahora, obviando la disparidad entre los errores de la órbita:

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

En la que se ha tenido en consideración que:

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

Donde se observa de manera explícita la diferencia entre los errores dispuestos en cada uno de los receptores terrestres.

3.2 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)

El sistema EGNOS es el sistema SBAS de origen europeo. Fue desarrollado de manera conjunta por la Comisión Europea, la ESA (*European Space Agency*) y Eurocontrol. Se trata del mayor proyecto diseñado por parte de Europa en cuanto a aportación a los sistemas de navegación. Durante sus años de funcionamiento ha apoyado a los sistemas de navegación basados en satélites GPS y GLONASS, ofreciéndoles un sistema de aumentación fiable en toda el área europea. Se considera la primera parte del proyecto final que supone la creación del sistema Galileo con uso conjunto del sistema EGNOS, proporcionando a la Unión Europea unos servicios excepcionales para el futuro [18].

La creación del sistema EGNOS se comenzó en el año 2005, concluyendo en el año 2009 con la consecución de la operatividad del sistema. Más adelante, en el año 2011, el sistema obtuvo la certificación para formar parte en las aplicaciones del servicio *Safety of Life*. Además, desde el año 2012, es posible acceder a una serie de datos proporcionados por el sistema a través del Servicio de Acceso de Datos.

3.2.1 Arquitectura

El sistema EGNOS, al igual que los demás sistemas SBAS, se compone por los 4 segmentos principales explicados previamente.

En primer lugar, encontramos el Segmento Espacial, compuesto por 4 generaciones de satélites de diferentes prestaciones dependiendo de su tecnología incorporada. Actualmente solo 2 de estos satélites se encuentran plenamente operativos. Las diferentes generaciones de satélites junto con sus características se describen a continuación [18]:

- Generación Inmarsat-3: esta generación está compuesta por 2 satélites: el F2 AOR-E, puesto en órbita en el año 1996, y el F5 IOR-W, en 1998. El F2 AOR-E utiliza el código PRN 120, mientras que el segundo de ellos transmite usando el PRN 126. Actualmente ambos se encuentran inoperativos y fueron retirados.

- Generación Inmarsat-4: la segunda generación de satélites de EGNOS incorpora el lanzamiento de 2 nuevos satélites: el F1 IOR, puesto en órbita en 2005, el F2 AOR-W, lanzado también en el año 2005, pero en el mes de noviembre, 6 meses después que el anterior, y el F3 Americas, lanzado en el año 2008, 3 años después que sus congéneres. Todos ellos hacen uso del código PRN 126, aunque no utilizan de forma operativa, sino de manera experimental realizando pruebas varias con el fin de obtener información relativa al funcionamiento de estos satélites.
- Astra-5B: se entiende como una generación nueva, pero se trata de un único satélite de condiciones diferentes a los anteriores. Este satélite fue lanzado en el año 2014 y todavía está operativo ofreciendo códigos PRN 123 a través de las bandas L1 y L5. Además, dispone de dos transpondedores capaces de actuar en las bandas Ku y Ka.
- Astra Ses-5: de igual manera que la anterior generación, esta se compone únicamente del satélite Astra Ses-5. Este satélite, que fue puesto en órbita en el año 2012, se encuentra en plena operatividad, emitiendo el PRN 136 y está equipado con transpondedores que usan bandas Ku y C.

De igual manera que la gran mayoría de los sistemas basados en satélites, en un futuro se espera que a través de los avances en tecnología se desarrollen nuevos satélites que se incorporarán a esta constelación para así ofrecer una serie de mejores servicios.

El segundo segmento es el Segmento Terrestre, el cual se caracteriza por su amplia redundancia conseguida gracias a su gran número de estaciones situadas sobre la superficie terrestre. Este segmento está compuesto por 4 MCC (*Mission Control Centre*), 6 NLES (*Navigation Land Earth Station*), una amplia red de estaciones RIMS (*Ranging Integrity Monitoring Stations*) y la red EWAN (*EGNOS Wide Area Network*), cada una de ellas con un propósito determinado que será explicado en el desarrollo de los siguientes párrafos[18].

- Estaciones RIMS: son las estaciones encargadas recibir la información procedente de los satélites y emitirla en dirección a los CPF (*Central Processing Facility*) existentes en cada una de los MCC. En el momento de inicio de servicio de EGNOS, el número de estaciones RIMS operativas era de 34, actualmente se dispone de 40 estaciones RIMS, estando una de ellas dedicada exclusivamente a tareas relativas al tiempo UTC. En un futuro se espera que el número de estaciones continúe su tendencia ascendente.

A su vez, las estaciones RIMS se dividen en 3 subtipos: las estaciones RIMS tipo A, las cuales ofrecen mediciones crudas procedentes de los satélites con el fin último de obtener correcciones en los centros de control; las estaciones RIMS de tipo B, las cuales hacen lo propio, pero con el fin de analizar la integridad del sistema; y las estaciones RIMS de tipo C, que tienen como fin la detección de anomalías dentro de las señales proporcionadas por los satélites.

- Centros MCC: existen 4 MCC situadas en Italia, Reino Unido, Alemania y España, formando una especie de cuadrado localizado en el centro de Europa. Estas estaciones se dividen en 2 partes: la parte CPF, que se encarga del procesamiento de los datos para así proporcionar las correcciones pertinentes a los relojes, las efemérides e incluso de la ionosfera, además de estimar errores relacionados con estas correcciones, como son el GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) y el UDRE (*User Differential Vertical Error*); y la parte de los CCF (*Central Control Facility*), centros en los cuales se realiza una gran serie de funcionalidades, siendo parte de estas la estimación de los parámetros que definen el funcionamiento del sistema, el monitoreo y control de la constelación, el almacenamiento de los datos, además de ofrecer la interfaz entre el ATC y el centro de soporte PACF.
- Estaciones NLES: se trata de 6 estaciones relacionadas directamente con los satélites (2 por satélite) las cuales, una vez recibida la información procedente de los CPF, generan las señales EGNOS que han de transmitirse en dirección a los satélites, haciendo uso del QOS (*Quality of Service*).

El segmento de soporte también se encuentra en la superficie terrestre y se encarga de proporcionar apoyo o mantenimiento en el momento en que sean precisados, quedando excluido este segmento del servicio directo y solo formando parte del sistema en determinadas situaciones. Este segmento está compuesto por dos tipos de instalaciones: las PACF (*Performance Assessment and Checkout Facility*), encargadas de analizar las prestaciones del servicio y de realizar el mantenimiento y la validación de este; y las instalaciones ASQF (*Application Specific Qualification Facility*), que se encargan de la certificación y soporte de las aplicaciones proporcionadas por EGNOS.

Con el fin de ofrecer una imagen del diseño de estos dos segmentos se puede observar la Figura 3.1, con un mapa detallado de la localización del ancho de las estaciones.



Figura 3.1: Distribución de las instalaciones del Segmento Terrestre de EGNOS [19]

Por último, el Segmento de Usuario está compuesto por todos aquellos receptores que, una vez recibidas las señales de los sistemas GPS, GLONASS o Galileo dispongan del *software* específico para aplicar las correcciones obtenidas mediante el sistema EGNOS [18].

3.2.2 Mensajes EGNOS

Los mensajes EGNOS tienen un diseño concreto que ha sido planificado de forma que este tenga la capacidad de ofrecer todos los servicios de la mejor manera posible. La definición de la estructura de los mensajes del sistema EGNOS fue llevada a cabo por la RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*), la cual se encarga del diseño de gran parte del entorno aeronáutico, como es el diseño de los espacios aéreos, equipamiento de las aeronaves y demás temas pertinentes a este sector. Esta comisión está formada por las principales organizaciones que toman parte en este sector, tanto industriales, como gubernamentales. Con el fin de presentar un mensaje uniforme en todo el ámbito aeroespacial, la RTCA creó el documento RTCA MOPS DO-229, en el cual se encuentra al detalle toda la normativa y especificaciones en cuanto al formato del SIS que ha de ser aplicado por parte de los sistemas SBAS y, por lo tanto, por el sistema EGNOS [18].

La estructura de estos mensajes se basa en una extensión de 500 bits, estando 250 de ellos disponibles cada segundo proporcionando información que se pone en manos del usuario final. Este mensaje es transmitido usando la banda de frecuencia L1 haciendo uso del servicio *GEO Ranging*. Esta señal utiliza el PRN a 1023 bit/s, siendo

esta una adaptación a la señal transmitida por el sistema GPS estadounidense, formándose finalmente con sus 37 primeros códigos PRN pueden ser utilizados como los del sistema GPS, y los posteriores hasta el código 120 constituyen la parte de EGNOS. El mensaje finalmente se puede dividir en 4 partes de finalidades diferentes [2]:

- Preámbulo (bits 0-7): su función es la sincronización del mensaje EGNOS con el mensaje típico del GPS.
- Identificador de Tipo de Mensaje (bits 8-13): esta parte del mensaje contiene la información necesaria para definir el tipo de mensaje que se está emitiendo y, consecuentemente, los datos siguientes del mensaje.
- Campo de Datos (bits 14-225): esta parte depende del identificador de tipo de mensaje y es donde se ofrecen las correcciones previamente estimadas junto con la información relativa a la integridad del servicio.
- Información de Paridad (bits 226-249): es la parte encargada de ofrecer la protección necesaria ante los errores que se puedan producir en el momento de recepción del mensaje.

El conjunto de los mensajes requiere de ser concatenado de una manera concreta. Con ese fin se utiliza la función WAD, introducida previamente, la cual haciendo uso de los parámetros IOD (*Issue of Data*) es capaz de editar los datos para conseguir la estructura definida para los mensajes EGNOS. Además, esta función es la encargada de proporcionar las correcciones que se han de aplicar, divididas en 3 tipos [2]:

- Correcciones rápidas: son las encargadas de reducir el impacto de los errores en el funcionamiento de los relojes de los satélites. Se ofrecen 3 tipos de mensajes, que han de ser decodificados posteriormente: los mensajes de tipo 1, que son aquellos que identifican el satélite que se usa en el proceso; los mensajes de tipo 0, 2, 3, 4 y 5, específicos de las correcciones rápidas, en los cuales se proporciona información relativa a la exactitud de las correcciones, como es el UDRE; y, por último, los mensajes de tipo 7, que indican el grado de degradación que pueden sufrir las correcciones.
- Correcciones lentas (largo plazo): se encargan de proporcionar la información referente a aquellos errores que sufren cambios de manera mucho más lenta, como pueden ser los errores en las efemérides del satélite. Estas, al igual que las rápidas, hacen uso de los mensajes tipo 1; de los mensajes de tipo 25, específicos de las correcciones lentas, en los cuales se expresan errores de posición del propio satélite entre otros; y de los mensajes de tipo 24, que son mensajes creados especialmente para la transmisión de correcciones lentas y rápidas conjuntamente, así como parámetros de integridad, como es el UDREi.
- Correcciones ionosféricas: como su nombre indica, se encargan de las correcciones relacionadas con todos aquellos parámetros que dependen del estado de la ionosfera. Para ello, se usan varios mensajes: el mensaje tipo 18, en el cual se proporciona información acerca del estado directo de la ionosfera; y mensajes del tipo 26, con datos relativos a la máscara IGP (*Ionospheric Grid*

Points), que es una especie de marco en el cual se simulan las condiciones de los satélites con respecto a la ionosfera, y la estimación del parámetro GIVE.

En la siguiente tabla se pueden observar de manera esquemática los distintos mensajes estandarizados que pueden ser transmitidos a través de este servicio. En la tabla se pueden observar 20 tipos diferentes de mensajes, pero en un futuro se podrá llegar a emitir 64 mensajes diferentes.

TIPO DE MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0	No emplear para aplicaciones de seguridad
1	Asignación de máscaras PRN
2-3-4-5	Correcciones rápidas
6	Información de Integridad
7	Factores de degradación para correcciones rápidas
9	Mensaje de Navegación GEO (X,Y,Z, tiempo, etc.)
10	Factores de degradación para correcciones ionosféricas y a largo plazo
12	Parámetros de sincronización entre SBAS y tiempo UTC
17	Almanaque de la constelación GEO
18	Máscara asociada a la IGP
24	Correcciones rápidas / Correcciones a Largo Plazo
25	Correcciones a Largo Plazo
26	Correcciones Ionosféricas
27	Mensaje del Servicio SBAS
28	Matriz de Covarianza del Reloj y las Efemérides
62	Mensaje para Test Interno
63	Mensaje Nulo

Tabla 3.1: Tipos de mensajes SBAS [2]

Según convenga debido a la situación del servicio, un mensaje u otro será escogido para ser transmitido y así cumplir las funciones requeridas. Los tipos de mensajes varían mucho, aunque también encontramos varios que pueden ser redundantes en determinadas situaciones. Por otra parte, es de vital importancia el entendimiento del valor obtenido en el indicador UDRE_i. Este puede ser igual a un rango de valores del 0 al 15 y a través de estos se puede estimar la situación del satélite [2].

Pues bien, se dan 3 casos bien diferenciados: el caso en que el UDRE_i sea igual a 15, el valor superior, en este caso el satélite se encontraría en estado DU (*Do not Use*), y, por lo tanto, como su nombre indica, no podría ser usado, ya que contiene un error intolerable; el segundo caso corresponde a aquel en el que el valor sea igual a 14, de esta forma, el satélite se encontrará en NM (*Not Monitored*), y expresa que el valor no está disponible y, por lo tanto, no se dispone de información acerca del UDRE de este satélite; y, por último, el caso en el que el valor vaya de 0 a 13, en tal caso, el satélite es plenamente utilizable y se emite el mensaje OK, siendo los valores más

pequeños el resultado de un error menor y, por lo tanto, un satélite con unas prestaciones superiores.

3.2.3 Servicios

El sistema de aumentación basado en satélites EGNOS ofrece 3 servicios claramente diferenciados: el Servicio Abierto (OS, *Open Service*), accesible para todos los usuarios; el servicio EDAS (EGNOS Data Access Service), en el cual se proporcionan todos los datos relativos al funcionamiento del servicio con fines tanto comerciales como profesionales; y el servicio de SoL (*Safety of Life*), el cual es capaz de ofrecer unas prestaciones excelentes y se usa en sectores con un alto nivel de criticidad, como es el aeronáutico. A continuación, se precisan con mayor detalle los 3 servicios mencionados [18].

En primer lugar, el Servicio Abierto es el servicio que puede ser usado por cualquier usuario que cumpla con las especificaciones de clase 3 del documento RTCA MOPS DO-229, que suelen ser cumplidas por la amplia mayoría de los dispositivos con capacidad de recibir estas señales. Para hacer uso de este servicio no se requiere de ningún tipo de autorización por parte de ningún organismo. Este servicio fue puesto en marcha en el año 2009 con el fin de garantizar el acceso libre por parte de cualquier ciudadano [20].

El Servicio Abierto está compuesto por una serie de señales que buscan ofrecer un posicionamiento y temporización de mayor precisión. Con este fin, el sistema hace uso de las propias señales GNSS para ofrecer una amplia mejora del rendimiento del servicio. Sin embargo, el Servicio Abierto no puede ser usado en un ámbito con características críticas, ya que sus prestaciones no tienen la calidad suficiente como para proporcionar un servicio que ofrezca garantías plenas a sus usuarios.

En cuanto al rendimiento de este servicio, este es capaz de ofrecer precisiones del orden de 3 metros en el plano vertical, y 4 metros en el plano horizontal, siendo estos valores de alto nivel, pero no suficiente como para pasar a formar parte de un sistema de navegación en el cual se deba trabajar con la más alta precisión e integridad. Los factores que hacen que este servicio no sea tan preciso como otros servicios son muchos, encontrándose entre ellos errores comunes como son los retrasos ionosféricos o los errores en la temporización de los relojes.

En segundo lugar, se dispone del servicio de *Safety of Life*, el cual es de manera muy probable, el servicio por excelencia ofrecido por el sistema EGNOS. Este es capaz de ofrecer unas prestaciones de calidad suficiente como para cumplir los requisitos necesarios como para formar parte de un sistema de navegación con necesidades críticas. Se usa en los sectores de navegación aérea, marítima, ferroviaria y el transporte por carretera [18].

Para poder acceder a este servicio a lo largo de toda el área disponible, es necesario que el usuario disponga del Acuerdo de Nivel de Servicio, proporcionado por

la sección de control de este servicio. Además, para poder hacer uso de este servicio, usuario debe haber demostrado y certificado que se encuentra en disposición de un receptor EGNOS que cumple con las características necesarias para operar en condiciones. Con el fin de unificar estos propósitos, el sistema EGNOS elaboró el EGNOS SoL SDD (*Service Definition Document*), en el cual se expresa de manera concreta los requisitos que se han de cumplir para poder hacer uso de este servicio.

El servicio *Safety of Life* se encuentra operativo desde el año 2011, en el cual comenzó a operar con una duración mínima estimada de 20 años. Por otra parte, este servicio es capaz de ofrecer apoyo y soporte a aproximaciones LPV, siendo estas sus propósitos que requieren de más precisión e incluyendo, por lo tanto, aproximaciones NPA y APV-I dentro del rango de servicios que ofrece.

Este servicio ha ayudado mucho a la optimización en todos los ámbitos de la navegación aérea, siendo importante en instancias como la seguridad aérea, la planificación de rutas y los movimientos en el área relativa a los aeródromos. Para conseguir estos altos objetivos, el servicio ha tenido que ser capaz de ofrecer un rendimiento extraordinario, acabando por ofrecer precisiones menores de 3 metros con tiempos de alerta menores de los 6 segundos, además de proporcionar una integridad excelente.

Por último, el tercer servicio nombrado es el EDAS, un servicio gestionado por el CDDS (*Commercial Data Distribution Service*), en el cual se emplean distintos medios para proporcionar datos relativos al funcionamiento del sistema EGNOS, como bien puede ser a través de Internet, donde su uso aumenta drásticamente en el ámbito comercial [21]. La operatividad de este sistema tuvo comienzo en el año 2012, ofreciendo el acceso a datos a través de las estaciones RIMS e incluso el acceso a la información disponible en el sistema en tiempo real, lo cual supone un gran avance en muchos campos de investigación. Más adelante, se han ido incorporando nuevas funciones de gran utilidad dentro del servicio EDAS, como son: el servicio SISNet, en el cual los usuarios del servicio son capaces de seleccionar los mensajes específicos que desean recibir en tiempo real; el servicio de datos FTP (*File Transfer Protocol*), donde se encuentran accesibles series enteras de datos históricos que hacen referencia al uso en el tiempo del sistema EGNOS; el tercero de ellos es el servicio NTRIP, del cual se pueden obtener las correcciones diferencias referentes a cada uno de los satélites; y, por último, el Servicio de Filtrado de Datos, en el cual es posible determinar la estación RIMS de la que se desea obtener información.

3.3 Sistemas SBAS adicionales

EGNOS supone un gran avance en cuanto a la mejoría de las prestaciones ofrecidas por sistemas GNSS, pero no es el único sistema SBAS existente. Aparte de él, se encuentran operacionales los sistemas WAAS y MSAS, y, por el momento, aparecen 3 que se encuentran en fase de desarrollo, el GAGAN, el SDCM y el SNAS [2].

3.3.1 WAAS

El sistema de aumentación basado en satélites WAAS (*Wide Area Augmentation System*) es el sistema que cubre el área compuesta por los Estados Unidos, México y Canadá. Este sistema es propiedad de los Estados Unidos y fue desarrollado por la FAA (*Federal Aviation Agency*) junto con la comunidad de aviación civil. El comienzo de la operatividad de este sistema se dio en el año 2003, momento en el que se certificó que el sistema cumplía los requerimientos necesarios para ofrecer el servicio de *Safety of Life* y a fecha de hoy es posible emplearlo en la gran mayoría de los aeropuertos del territorio estadounidense. Al igual que EGNOS, este sistema evoluciona de manera constante y se esperan nuevas adiciones al sistema dentro de unos años [3].

El sistema es capaz de dar servicio a una gran cantidad de operaciones aeronáuticas, con el máximo exponente de las aproximaciones LPV-200, incluyendo así todas aquellas operaciones que requieren de prestaciones más laxas. Para cumplir con los requerimientos que se le solicitan, este sistema cuenta con 3 segmentos: el Segmento Espacial, compuesto, al igual que EGNOS, por 3 satélites geoestacionarios con sus propios transpondedores aptos para retransmitir las señales SBAS; el Segmento Terrestre, que se organiza de tal manera que los centros WRS (Estaciones de Referencia de Área Amplia) reciben las señales de los satélites GPS, las estaciones WMS (Estaciones Maestras de Área Amplia) elaboran el mensaje de navegación a partir de los datos recabados, y, finalmente, las estaciones GUS (Estaciones de Comunicaciones) envían este mensaje a los satélites de tipo GEO; por último, el Segmento de Usuario lo componen todos aquellos receptores que cumplan con el estándar RTCA MOPS DO-229, necesario para hacer uso del sistema.

De igual manera que el sistema EGNOS, WAAS cuenta con 3 satélites geoestacionarios que emiten señales en la banda L1, haciendo uso de las funcionalidades *GEO Ranging*, WAD y GIC, que suministra todos los datos referentes a la integridad necesaria para los servicios explícitos de navegación ofrecidos por los satélites GPS y GEO. Dentro de unos años, siguiendo con el plan creado por la FAA, la fase III del proyecto pasará a formar parte del sistema y se podrá utilizar la banda L5 para diferentes funciones asociadas con el sistema.

3.3.2 MSAS

En el año 2007 el sistema MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System*) comenzó su fase operativa y se convirtió así en uno de los tres sistemas SBAS operativos existentes. Este sistema es de origen japonés y es compatible con el sistema de navegación basada en satélites GPS, con el cual interactúa para ofrecer unas amplias prestaciones en su área de cobertura. Por el momento, la operación de mayores requerimientos en la que puede tomar parte es en las aproximaciones NPA, sin

embargo, se espera que, dentro de pocos años, las aproximaciones LPV-200 sean realizables haciendo uso de este sistema [2].

Su arquitectura está basada en 3 segmentos: el Segmento Espacial, compuesto por 2 satélites de carácter geoestacionario; el Segmento Terrestre, compuesto por 4 estaciones de monitorización de los satélites, 2 estaciones con la función de controlar el sistema, y 2 centros donde se determinan las variaciones en las órbitas; finalmente, el Segmento de Usuario está compuesto por los receptores que se encuentran capacitados para formar parte del sistema.

3.3.3 GAGAN

El sistema GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*) es el sistema de aumentación basado en satélites desarrollado por la India, cuya elaboración dio comienzo en el año 2001. Con el fin de estructurar este sistema de manera correcta, su desarrollo se ha dividido en 3 fases: la primera de ellas es la TDS (Sistema de Demostración de Tecnología), en la cual se trataba de demostrar la posibilidad del funcionamiento de este sistema, llevándose a cabo con fin en el año 2007; la segunda fase fue la IEP (Fase Experimental Inicial), en la cual, de manera experimental, se comprobó que el sistema es capaz de proporcionar soporte para un nivel RNP 0.1 y aproximaciones APV-I; y, en tercer lugar, la fase operacional final (FOP), en la cual se conseguiría la operatividad plena del sistema [2].

En cuanto a los segmentos del sistema, se aprecian los 3 característicos: el Segmento Espacial, con 3 satélites geoestacionarios puestos en órbita en los años 2011, 2012 y 2015; el Segmento Terrestre, con una estructura muy similar al WAAS, con 15 estaciones de monitoreo denominadas INRES, un único centro de procesado y control (INMCC) y la estación desde la cual se envían los datos a los satélites geoestacionarios, la INLUS; por último, el Segmento de Usuario tiene la misma función que en sistemas anteriores, componiéndose de los receptores terrestres con la capacidad de recibir y procesar las señales procedentes del sistema GAGAN.

Capítulo 4

PBN (Performance Based Navigation)

Hasta este punto, el contenido de este trabajo ha estado dirigido principalmente a consolidar una base teórica con respecto a los sistemas de navegación y su relación con las diferentes constelaciones de satélites. A partir de ahora, se pasa a enfocarse más detalladamente en la exposición de las distintas aplicaciones y funcionalidades que se pueden lograr a través de los sistemas ya desarrollados. Asimismo, los siguientes contenidos forman la base en la que se sustenta la parte práctica de este trabajo de fin de grado.

4.1 Preámbulo

Durante los últimos años hasta el comienzo de la conocida pandemia del coronavirus del año 2020, se ha observado una clara tendencia de aumento de la demanda en el sector aeroespacial, que se prevé que continúe creciendo una vez la crisis existente haya sido superada. Esta demanda implica el enfoque del sector en una optimización plena de los servicios ofrecidos, así como del espacio y tiempo disponibles para ellos [2].

Para lograr estos avances, se requiere de un esfuerzo por parte del ATM (*Air Traffic Management*) para conseguir que la organización de esta industria sea óptima. Esto es cada vez más factible debido al desarrollo de nuevas tecnologías emergentes que facilitan y acercan cada vez más un futuro más eficiente para la aviación. Siendo más específicos, las técnicas RNAV (*Area Navigation*) constituyen un elemento clave en esta mejora.

Durante años, estas técnicas RNAV están siendo implementadas en diferentes partes de los procesos aeroespaciales. Es por ello, que cada vez se requiere más que todo el personal de este sector esté capacitado para operar con este tipo de técnicas, para así lograr que se implementen de manera eficaz y gradual al mundo de la aviación. De tal forma, los sistemas RNAV forman en núcleo de la conocida PBN (*Performance Based Navigation*), en la cual se expresan los requisitos que se necesitan para lograr incorporar estos sistemas en la vida aérea.

Llegado a cierto punto de la historia de la aviación comercial, las aeronaves se basaban en métodos de navegación que utilizaban infraestructuras terrestres para llegar a su destino pasando por estas balizas, de forma que el trayecto a seguir no era el directo. Los sistemas de tal forma son los VOR (*VHF Omnidirectional Range*), DME (*Directional Measuring Equipment*) o NDB (*Non-Directional Beacon*) ubicados en posiciones estratégicas. Además de no ofrecer la ruta más directa posible hasta el destino, estos sistemas suponían un incremento en las separaciones necesarias entre

aeronaves, dada su confluencia en dichas rutas. La RNAV supuso un punto de inflexión por el simple hecho de ofrecer la posibilidad de volar directamente de un punto a otro sin la obligación de pasar por determinados puntos intermedios. Con el fin de concretar las medidas y disposiciones necesarias para este tipo de vuelos, la OACI desarrolló la RNP (*Required Navigation Performance*), que se componía de una serie de especificaciones que permitían a los aviones utilizar estos sistemas.

Con el paso de los años y la creación de nuevas tecnologías, las implementaciones RNP dejaron de ser usadas por el grueso de los usuarios del espacio aéreo y, por lo tanto, quedó ciertamente obsoleta. Es por ello que la OACI insistió en la necesidad de crear un marco donde se definan las distintas aproximaciones y operaciones a realizar. Es así como surgió la navegación PBN.

De esta forma, el PBN busca la unificación de los diferentes procesos existentes proporcionando un modelo estándar que pueda ser usado en todo el entorno aeroespacial. En los siguientes puntos, se concretará de manera detallada el funcionamiento de este sistema y sus características.

4.2 Concepto PBN

Tal como se ha explicado previamente, el concepto de PBN ha logrado sustituir al concepto reinante anterior, conocido como RNP. De esta manera, el PBN ha pasado a aglutinar las operaciones RNAV y RNP, contando en conjunto con las siguientes operaciones: PRNAV, RNAV 1, RNAV 2, RNAV 10, RNP <1, RNP 1, RNP 2 y RNP 4. De tal forma quedan definidos estos procedimientos dentro del concepto PBN, previniéndose así de confusiones y habiendo situado estas operaciones en el ámbito temporal.

Con el fin de facilitar el entendimiento de la estructura que se trata de explicar, se puede observar la Figura 4.1, en la cual una vez dividido el concepto de Espacio Aéreo, se expresa gráficamente la composición del sector PBN dentro del esquema.

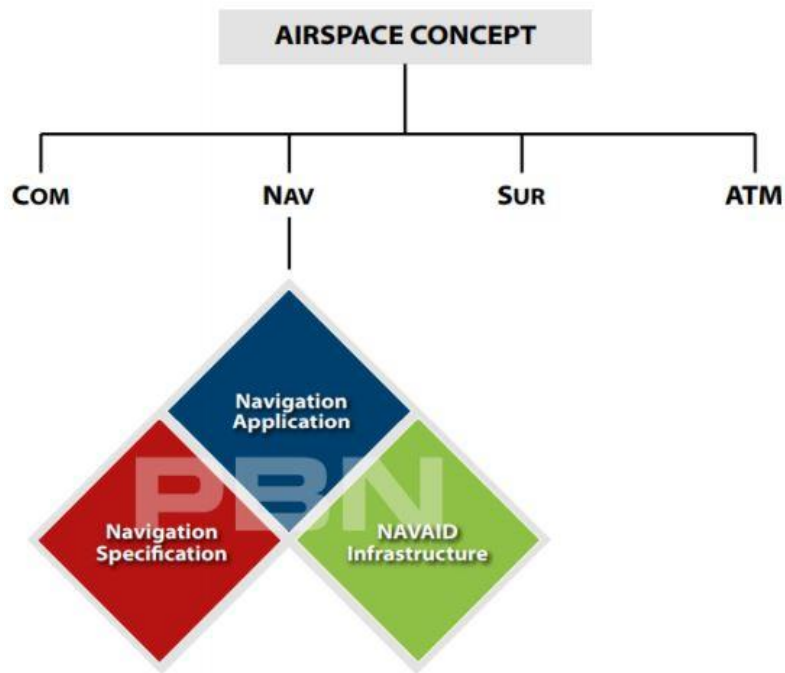


Figura 4.1: Componentes de la navegación PBN [22]

El esquema superior divide el concepto de Espacio Aéreo en 4 partes: COM (*Communication*), NAV (*Navigation*), SUR (*Surveillance*) y ATM (*Air Traffic Management*). Se puede observar que el concepto PBN se encuentra dentro de la división de Navegación, como parece lógico, ya que se encarga de regular la navegación en ciertas partes de la ruta. Más allá de la definición de la navegación PBN, se puede observar que esta se divide en 3 sectores, que se detallan a continuación [18]:

- Especificación de Navegación: este apartado establece los parámetros de rendimiento que se han de lograr tanto a nivel técnico como a nivel operacional para realizar operaciones tanto RNAV como RNP, diferenciándose estas en que la RNP incluye datos acerca del monitoreo de los parámetros y de los tiempos de alerta. Asimismo, proporciona información acerca de cómo el equipo de navegación debería actuar en relación con la Infraestructura de Radioayudas para que de tal forma se logre alcanzar los requerimientos.
- Infraestructura de Radioayudas: en este apartado se detalla la información correspondiente a las diferentes estructuras terrestres que sirven como balizas en el proceso de aeronavegación. Cabe destacar que los sistemas NDB no son tomados en cuenta en este punto, ya que no se encuentran especificados para la navegación PBN.
- Aplicación de la Navegación: este apartado define como se han de aplicar los dos puntos anteriores en relación al contexto del Espacio Aéreo, en el cual se han de cumplir ciertos objetivos para lograr los requerimientos.

4.3 Especificaciones de navegación

Como se ha comenzado a introducir en el apartado anterior, las especificaciones de aeronavegación se dividen en 2: RNAV y RNP, cuya diferencia se encuentra en el hecho de que el RNP requiere de la monitorización de los parámetros de *performance* y de los parámetros referentes a las alertas. Se explica de manera más detallada a continuación [18].

- RNAV: conocida como navegación de área, esta especificación de navegación hace posible las operaciones de una aeronave a partir del uso combinado de radioayudas y la estimación del seguimiento de la ruta derivada del movimiento de la propia aeronave. Con tal fin, la aeronave en cuestión dispone de un sistema informático en el que se proyecta el plan de vuelo a seguir a partir de la introducción de los puntos de control que se utilizan de referencia, en forma 2D. Esta especie de ordenador es capaz de integrar la posición de la aeronave en tiempo real para así compararla con la definición previa del plan de vuelo. Por supuesto, para hacer uso de este sistema, la aeronave debe contar con todos los sistemas requeridos para el uso de la especificación RNAV.

A su vez, las operaciones RNAV se dividen de tal forma que se denominan RNAV X, siendo la X igual a la precisión en millas náuticas en cuanto a la estimación de la posición en el plano horizontal. Comúnmente estos sistemas son 2D, pero también se pueden encontrar sistemas 3D, con guiado vertical, e incluso sistemas conocidos como 4D por el hecho de tratar la precisión del tiempo de la misma manera.

- RNP: haciendo uso de especificación se pueden lograr grandes resultados en cuanto a optimización del espacio aéreo y de los tiempos de separación requeridos. Esto se debe a que este servicio, aparte de proporcionar una gran precisión, ofrece los parámetros relacionados con la integridad del servicio e información del estado de las alertas.

Los sistemas RNP disponen de la misma nomenclatura que los RNAV, denominándose RNP X. Por otra parte, es necesario entender que el monitoreo del error nombrado se aplica directamente sobre el TSE (*Total System Error*), en el cual se agrupan los errores tanto de navegación como técnicos, como de computación como incluso de salida en el *display* de la propia aeronave. Asimismo, se establece en el RNP que si la precisión indicada no es alcanzada o si la integridad no es la necesaria.

En la siguiente figura se puede visualizar de manera esquemática la clasificación de las especificaciones, dividiéndose estas en 4 RNAV y 7 RNP.

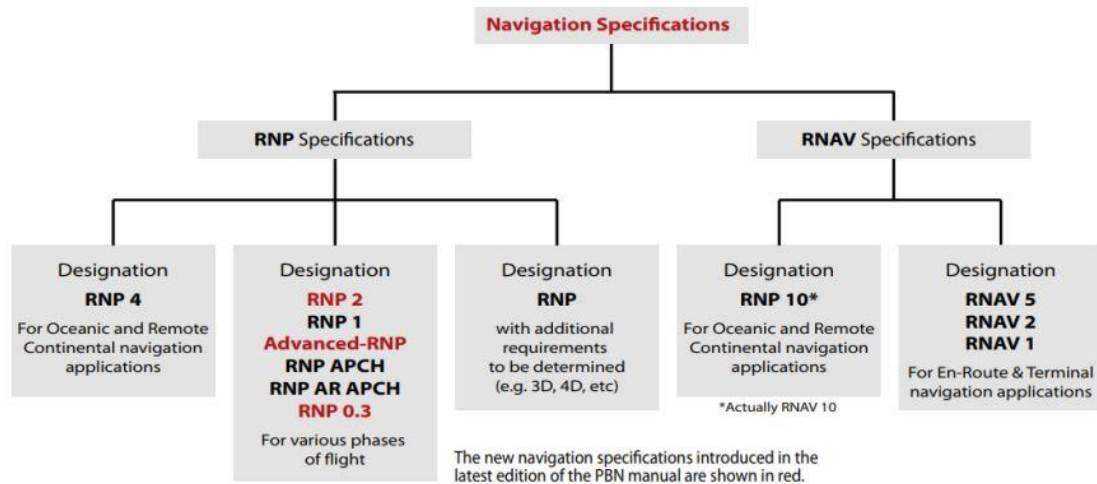


Figura 4.2: Especificaciones de navegación PBN [22]

Dentro de las especificaciones dispuestas para RNAV, encontramos la RNAV 1, la cual hace de soporte para la P-RNAV (*Precision Area Navigation*), el tipo de navegación en el cual las rutas se extraen de manera directa de la base de datos del FMS (*Flight Management System*), haciendo imposible para la tripulación la introducción de nuevos puntos de control al plan de vuelo. Estas rutas utilizan tanto métodos DME/DME, como DME/VOR, como sistemas de navegación GNSS, además de ofrecer la opción de utilizar sistemas inerciales. Los usos principales del RNAV 1 son los SID (*Standard Instrument Departure*) y los STAR (*Standard Arrival Route*).

En segundo lugar, se utiliza la RNAV 2 con el fin de proporcionar servicio a operaciones de navegación en ruta con radar en zona estadounidense. Por otra parte, la RNAV 5, que se conoce también por el nombre de B-RNAV (*Basic Area Navigation*), se usa en las situaciones en las que el avión se encuentre a altitudes considerables y la criticidad de las operaciones no sea alta. Finalmente, la RNAV 10, que no encuentra grandes diferencias con la RNP 10, se utiliza en entornos donde no se requiere de las mejores prestaciones, como son tramos de ruta en los que se pasa por zonas oceánicas y remotas [18].

En el lado contrario, se dispone de los servicios RNP, los cuales resultan de gran utilidad en zonas donde la densidad de radioayudas es bastante pobre y los servicios ATS no pueden actuar con facilidad. Se cuenta con un mayor número de especificaciones que en las RNAV. Siendo la menos precisa de las que se va a proporcionar información en detalle, la RNP 2 se utiliza comúnmente en fases de localización oceánica en las cuales no se halla un tráfico muy concurrido. Por otra parte, la RNP 1 es usada en procedimientos como las llegadas, junto con las aproximaciones iniciales, intermedias y frustradas, así como en salidas, lo cual es menos común.

Además de las conocidas como RNP X, estos procedimientos también emplean nuevas nomenclaturas como es el caso de la A-RNP (*Advanced RNP*), la cual ha sido diseñada para la totalidad de las fases de vuelo, implementando en la especificación

procedimientos nuevos como son los virajes con radio fijo y diversas operaciones en el entorno del área terminal.

Finalmente, formando parte también de la especificación RNP, se encuentran las RNP APCH y RNP AR APCH, las cuales se emplean específicamente para aproximaciones, y la RNP 0.3, que se define con la finalidad de proporcionar servicio a los helicópteros.

4.4 Especificaciones en aproximaciones (RNP/AR APCH)

Debido al aumento de las tecnologías útiles para las operaciones en fase final de las aeronaves, cada vez se dispone de más tipos de aproximaciones y más servicios que las ofrezcan. Es por ello que en el año 2017 se decidió clasificar de manera ordenada los diferentes sistemas de aumentación y las técnicas de aproximación junto con sus relaciones. Este proceso fue llevado a cabo por la OACI, EUROCONTROL y la EASA, dando como resultado una extensa gráfica disponible en la figura 4.3 [23].

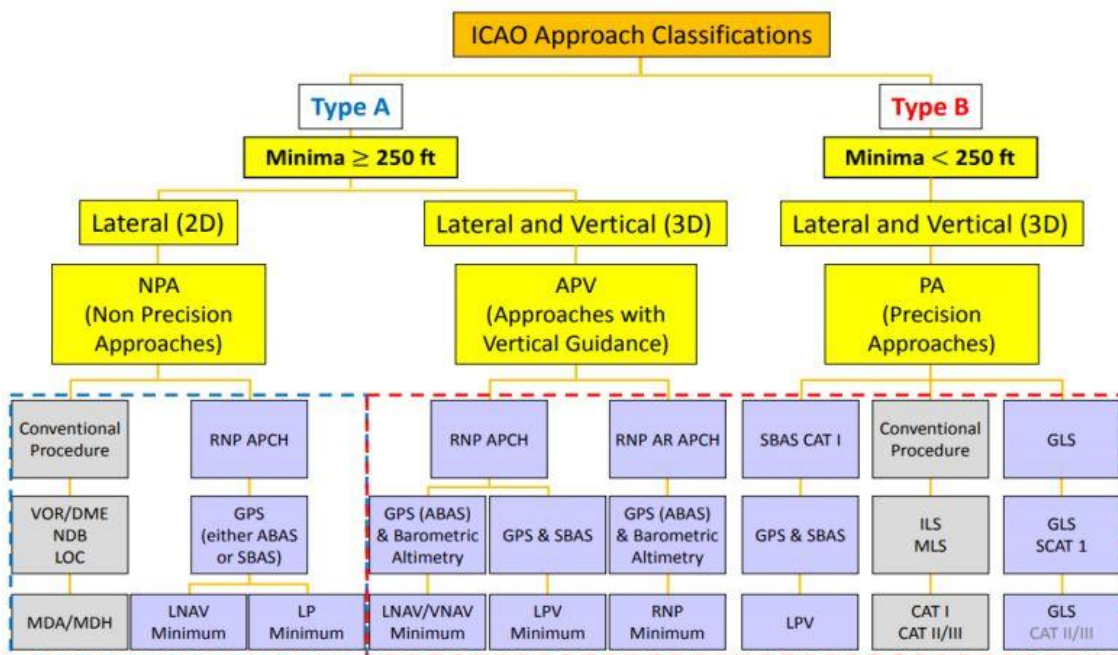


Figura 4.3: Tipos de aproximaciones [43]

Una vez definido este nuevo marco, se pasa a explicar en detalle cada una de las aproximaciones de interés para acabar incidiendo en las que dan base a la parte práctica de este trabajo. Con tal fin, se observan en primera instancia las de Tipo A, que proporcionan servicio a las aproximaciones de ámbito visual que se encuentren por encima de los 250 pies, y las aproximaciones de tipo B, que son las que se sitúan por debajo de dicha altitud. Asimismo, merece la pena recordar que las operaciones 2D

ofrecen únicamente guiado lateral, al mismo tiempo que las aproximaciones 3D hacen lo propio añadiendo el guiado vertical.

Pasando a las aproximaciones NPA (*Non-Precision Approach*), estas son aquellas que, siendo de carácter instrumental, únicamente proporcionan guiado horizontal pudiendo hacer uso de gran cantidad de sistemas, como son las radioayudas VOR, DME, NDB, LOC, así como los sistemas de aumentación ABAS o SBAS dando apoyo a un sistema GNSS. Por otra parte, las aproximaciones PA (*Precision Approach*) son aquellas que sí disponen de guiado vertical para así ofrecer un descenso controlado a la hora del aterrizaje. Los procedimientos incluidos en este tipo de aproximaciones son el ILS y el MLS, de forma conjunta con sus categorías adicionales I, II y III, que se diferencian en los requerimientos de cada una de ellas, siendo la categoría III la más difícil de proporcionar. Para estos casos se emplean sistemas de navegación GNSS apoyados por SBAS o GBAS.

De otra manera, las aproximaciones APV (*Approach with Vertical Guidance*) son similares a las PA, pero estas incluyen en su descripción la altura de decisión que se ha de tener en cuenta. Dentro del concepto de estas aproximaciones se definen las APV Baro, entendidas como aquellas aproximaciones APV que implementan la funcionalidad VNAV haciendo uso de índices barométricos que deben cumplir ciertos parámetros.

Finalmente, dentro del PBN se encuentran las aproximaciones RNP APCH y RNP AR APCH, como se ha expresado anteriormente. Pues bien, dentro de estas se encuentran varios tipos diferentes de aproximación con finalidades distintas:

- Aproximaciones LNAV (*Lateral Navigation*): es conocida también como GPS NPA. Se trata de una aproximación de no precisión que se orienta al guiado horizontal, es decir, en 2D, dejando de lado el guiado vertical. El guiado se proporciona a partir de un sistema GNSS junto con un ABAS, utilizando un único RAIM. Cabe destacar que esta aproximación no proporciona un incremento de la sensibilidad lateral a medida que la aeronave se aproxima a la pista.

El procedimiento que sigue consiste en que cuando se alcanza el MAPT (último fijo de aproximación), la aeronave ha de descender a la MDA/H (altitud mínima de descenso) haciendo uso del altímetro barométrico de a bordo.

- Aproximaciones LP (*Localizer Performance*): este tipo de aproximaciones, al igual que la LNAV, proporciona únicamente guiado lateral, por lo que se dice que es de no precisión. El guiado se obtiene a partir de un sistema GNSS junto con un SBAS y, en este caso, la sensibilidad lateral se ve incrementada a medida que la aeronave se aproxima a la pista de aterrizaje, al igual que sucedería si se usase el localizador de un ILS.
- Aproximaciones LNAV/VNAV (*Lateral Navigation/Vertical Navigation*): se trata de una aproximación con guiado vertical (APV), es decir, una aproximación en 3D. Al igual que en las aproximaciones LNAV, el guiado lateral se proporciona a partir de un sistema GNSS y un ABAS utilizando un único RAIM. Por otra parte, el guiado vertical se consigue a partir de un altímetro barométrico, por lo que

este tipo de aproximaciones se conoce también por el nombre de APV/Baro VNAV.

- Aproximaciones LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*): se trata de un tipo de aproximación que dispone de guiado vertical (APV) en la cual el guiado, tanto lateral como vertical, son proporcionados por un sistema GNSS junto con un sistema SBAS. Se realiza mediante guiado angular, por lo que se obtiene más precisión a medida que la aproximación avanza, como sucedería con un localizador de ILS.
- Aproximaciones RNP AR APCH (*Special Aircraft and Aircrew Authorization Required Approach*): también conocidas como RNP *Minimum*, para este tipo de aproximación RNP el valor del TSE lateral ha de ser menor que los valores estándar RNP que se utilizan en cualquier otro punto de la aproximación. Es por ello que se reducen en gran manera las superficies de evaluación de obstáculos tanto laterales como verticales que están establecidos de manera conjunta para las aeronaves, pasando a usar unos criterios mucho más flexibles con utilidad únicamente en escenarios muy determinados. Las características principales que diferencian estas aproximaciones de las RNP APCH son las siguientes:
 - Los valores de TSE serán siempre menores de 0.10 NM en cualquiera de los segmentos de aproximación.
 - Aquellos segmentos de radio fijo existentes en una trayectoria curva tienen la posibilidad de ser realizados únicamente tras haber superado el PFAF (*Precise Final Approach Fix*).

Es importante comentar que, para que una aeronave pueda realizar este tipo de procedimientos, esta ha de disponer como mínimo de una unidad de referencia inercial única y sensores GNSS duales, como son el ADS, FMS o los autopilotos. Además de lo mencionado anteriormente, este tipo de procedimiento pueden incluir disposiciones como la elusión de espacios aéreos conflictivos, espacios determinados del terreno y sus obstáculos, o cuestiones medioambientales.

4.5 SESAR

El programa SESAR (*Single European Sky ATM Research*) sirven como referencia central para el proyecto conocido como *Single European Sky (SES)*. La meta principal de este programa es la modernización y armonización de los sistemas ATM haciendo hincapié en la definición, desarrollo, validación y despliegue de nuevas tecnologías con el fin de mejorar en gran medida la *performance* de todo el entorno ATM. Las soluciones que se encuentran dentro de este programa se denominan “operaciones SESAR”. El concepto que envuelve la palabra SESAR está definido en el Plan Maestro Europeo para el ATM, en el cual también se encuentran los diversos cambios en cuanto a las operaciones junto con un plan específico para cada una de ellas [23].

Por otra parte, todos los componentes relativos a este proceso son desarrollados y validados por la SJU (*SESAR Joint Undertaking*). Esta asociación fue creada en 2007 por parte de Eurocontrol y la Comisión Europea y durante los años siguientes otras 15 organizaciones de gran calado se han ido adhiriendo a la misma, entre las que se encuentran todo tipo de servicios como son los fabricantes de aeronaves y componentes de aviónica, operadores de aeropuertos y proveedores de servicios de navegación aérea.

Como ya se ha comentado el concepto SESAR está inscrito dentro del proyecto de *Single European Sky (SES)*, en el cual se trata de perfeccionar el funcionamiento del entorno ATM. Para tal fin, SESAR es determinante, ya que aumenta tanto la conectividad como la sostenibilidad de la aviación europea. Este proyecto se comenzó en 2004 y está estructurado basándose en 3 fases [23]:

- Fase de definición (2005-2008): es la fase en la cual se definen todas las directrices a seguir, entre las que se encuentra el Plan Maestro, en el cual se exponen la metodología a la hora de establecer el contenido, desarrollo y despliegue de futuros sistemas ATM. Esta fase tuvo como principal motor a Eurocontrol y trataba de servir como vínculo con el Plan de Navegación Aérea Global de la OACI.
- Fase de desarrollo (2008-2024): el control de esta fase recae en la SJU mencionada previamente. En ella, se llevan a cabo la producción y validación de todos los componentes y operaciones expuestos en la fase de definición. Además, a la vez que se validan y comprueban, se crea un catálogo de soluciones de gran utilidad para siguientes operaciones del ATM.
- Fase de despliegue (2015-2035): el objetivo de esta fase es básicamente la producción masiva y la implementación de cada uno de los componentes en su localización establecida, pasando así a formar parte de los sistemas y componentes activos en terreno europeo.







A pesar de que la única fase completada es la fase de definición, ya se han conseguido varios hitos en las otras 2 fases como por ejemplo que en el año 2014 se abrió por primera vez una torre de control remota en Suecia, con la cual el control del tráfico del aeropuerto se produce desde una torre externa junto con la torre de control usual, permitiendo así mayor flexibilidad e incentivando a las economías regionales menores; y también en 2015 se realizó de forma integrada al tráfico comercial por primera vez el vuelo de prueba de un dron civil de grandes dimensiones.

Por otra parte, cabe destacar la gran cantidad de aportaciones específicas que pretenden incorporar el proyecto SESAR al entorno ATM, como son las siguientes [23]:

- Aumentar la productividad en cuanto a los servicios ANS (*Air Navigation Services*): se trata de aumentar la cantidad de procesos automáticos para así poder las intervenciones de los controladores aéreos.
- Mejorar la eficiencia de los servicios ANS: se prevé estandarizar tanto el CNS como los centros de control remotos.

- Aumentar la colaboración entre operadores: se trata del intercambio de información de diversas compañías con el fin de ofrecer una mayor predictibilidad a las operaciones.
- Mejoras en cuanto a la seguridad (*Safety*): se lograría aumentando la redundancia en los sistemas para trazar escenarios más seguros.
- Mejoras en cuanto a la seguridad (*Security*): poniendo especial atención a la ciberseguridad.
- Adhesión de los nuevos tipos de aeronaves al espacio aéreo: especialmente dedicado a la inclusión de los RPAS en una vida cotidiana futura.

A forma de esquema, se expone en la figura 4.4, una imagen extraída directamente de la web de SESAR en la cual se expresan de manera gráfica los hitos y mejoras que se pretender obtener gracias a este proyecto.

Key performance area	SES High-Level Goals vs. 2005	Key performance indicator	SESAR ambition vs. baseline 2012	
			Absolute saving	Relative saving
 Cost efficiency: ANS productivity	Reduce ATM services unit cost by 50% or more	<ul style="list-style-type: none"> • Gate-to-gate direct ANS cost per flight - Determined unit cost for en-route ANS* - Determined unit cost for terminal ANS* 	EUR 290-380	30-40%
 Operational efficiency	-	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel burn per flight (tonne/flight) • Flight time per flight (min/flight) 	<ul style="list-style-type: none"> • -8 min • 0.25-0.5 tonne 	<ul style="list-style-type: none"> • 3-6 % • 5-10 %
 Capacity	Enable 3-fold increase in ATM capacity	<ul style="list-style-type: none"> • Departure delay (min/dep) - En-route air traffic flow management delay* - Primary and reactionary delays all causes • Additional flights at congested airports (million) • Networkthroughput additional flights (million) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1-3 min • 0.2-0.4 (million) • 7.6-9.5 (million) <small>Additional flights, not saving</small>	<ul style="list-style-type: none"> • 10-30 % • 5-10 %¹ • 80-100 %²
 Environment	Enable 10 % reduction in the effects flights have on the environment	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ emissions (tonne/flight) - Horizontal flight efficiency (actual trajectory)* - Vertical efficiency - Taxi-out phase 	0.79-1.6 tonne	5-10 %
 Safety	Improve safety by factor 10	<ul style="list-style-type: none"> • Accidents with ATM contribution 	No increase in accidents	Improvement by a factor 3-4
 Security	-	<ul style="list-style-type: none"> • ATM related security incidents resulting in traffic disruptions 	No increase in incidents	

Metrics with monetary value in business view

Figura 4.4: Previsión para 2035 del programa SESAR [23]

Capítulo 5

Requisitos de prestaciones para aproximaciones LPV-200

Una vez expuesta la navegación PBN y las diferentes aproximaciones que a partir de ella se pueden realizar, queda centrarse en la forma y requisitos que caracterizan al tipo de aproximación conocido como LPV-200. Pues bien, a modo de recordatorio de capítulos anteriores, cabe decir que esta operación dispone tanto de guiado lateral como vertical, ambos proporcionados por un conjunto formado por un sistema GNSS y un SBAS, en el cual la altura de decisión es de 200 pies. A continuación, se detallan los diferentes parámetros necesarios para poder implementar una aproximación LPV-200 [18].

5.1 Precisión

Se trata del parámetro que indica la diferencia entre la posición estimada por el sistema y la posición real del receptor. Al tratarse de una medida de carácter estadístico, ésta siempre ha de ir acompañada por el valor relativo a la incertidumbre del parámetro [24].

La precisión puede variar a razón de las dimensiones en las que ésta se mide. En concreto, podemos hablar de precisión 1σ , cuando se trata de una única dimensión (precisión vertical), 2σ , cuando se evalúan 2 dimensiones (precisión horizontal) y 3σ , en el caso de las 3 dimensiones (precisión horizontal y vertical).

Es también común el encontrar este parámetro descrito en forma de percentil, encontrando de manera más frecuente el percentil 95% acompañado de la media y desviación.

Finalmente, en la práctica, este parámetro se encuentra representado por los valores del error de posicionamiento horizontal (HPE), el error de posicionamiento vertical (VPE) y los errores respectivos de navegación (HNSE y VNSE).

5.1.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200

En la tabla siguiente se encuentran los valores relativos a los mínimos establecidos por la OACI para los 3 tipos de aproximaciones. Para el procedimiento LPV-200 los requisitos de precisión son de 16 metros en horizontal y de 6 a 4 en la precisión vertical [24].

	Precisión	
	<i>Precisión Horizontal 95%</i>	<i>Precisión Vertical 95%</i>
Aproximaciones de no precisión (NPA)	220 m	N/A
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	16 m	20 m
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	16 m	6 a 4 m

Tabla 5.1: Requisitos de precisión de la OACI [24]

De manera similar, se muestran a continuación, los valores ofrecidos por el servicio *Safety Of Life* del sistema EGNOS.

	Precisión (EGNOS)	
	<i>Precisión Horizontal 95%</i>	<i>Precisión Vertical 95%</i>
Aproximaciones de no precisión (NPA)	220 m	N/A
APV-I & LPV-200	3 m	4 m

Tabla 5.2: Valores de precisión ofrecidos por EGNOS [18]

Una vez observadas ambas tablas, se concluye de manera clara que el sistema EGNOS cumple los requisitos solicitados por la OACI, ofreciendo una precisión horizontal y vertical de 3 y 4 metros, respectivamente.

5.2 Integridad

La integridad de un sistema se entiende como la capacidad que tiene éste para avisar al usuario en caso de que el sistema se encuentre operando fuera de unas condiciones mínimas de precisión [24].

Entorno a este concepto se definen varios parámetros:

- Límite de Alerta (*AL*): valor en el cual, al ser sobrepasado por el error de posición, se ha de generar una alerta dentro del sistema.
- Tiempo de Alerta (*TAL*): este concepto se corresponde con el periodo de tiempo existente desde que el límite de alerta es superado y el momento en el que la alarma se genera.
- Riesgo de Integridad (*IR*): se trata de la probabilidad de que se supere el límite de alerta en un cierto momento.
- Nivel de Protección (*PL*): con este concepto se hace referencia a un parámetro estadístico que cuantifica la posibilidad de que se haya de generar una alerta de forma absoluta. Existen el horizontal y vertical (*HPL* y *VPL*, respectivamente).
- Índice de seguridad (*HSI* o *VSI*): es el parámetro que se emplea para comprobar la integridad del sistema. Viene dado por la relación entre el error de posición y el nivel de protección. Ha de ser menor que 1 para indicar el correcto funcionamiento del sistema.

5.2.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200

En la tabla 5.3 se pueden apreciar los valores mínimos de integridad que la OACI ha determinado como requisitos para el uso de la aproximación LPV-200.

	Integridad	
	<i>Integridad</i>	<i>Tiempo de alerta</i>
Aproximaciones de no precisión (NPA)	1 – 1x10 ⁻⁷	10 s
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	1 – 2x10 ⁻⁷	10 s
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	1 – 2x10 ⁻⁷	6 s

Tabla 5.3: Requisitos de integridad de la OACI [24]

Y seguidamente, se pueden observar los valores ofrecidos por EGNOS en cuanto a integridad.

	Integridad (EGNOS)	
	<i>Integridad</i>	<i>Tiempo de alerta</i>
APV-I & LPV-200	1 – 2x10 ⁻⁷	Menos de 6 s
Aproximaciones de no precisión (NPA)	1 – 1x10 ⁻⁷	Menos de 6 s

Tabla 5.4: Valores de integridad ofrecidos por EGNOS [18]

Finalmente, se observa que los parámetros de integridad, de la misma manera que los de precisión, también se encuentran dentro de los límites establecidos por la OACI.

5.3 Continuidad

La continuidad de un sistema se entiende como la capacidad que tiene éste de proporcionar servicio de manera ininterrumpida durante un periodo de tiempo determinado. Lo más común es definir esta continuidad durante 15 segundos o 1 hora, siendo de 15 segundos en una aproximación LPV-200 [24].

Se entienden como errores de continuidad aquellos errores que supongan un fallo grave del sistema, como pueden ser la pérdida de señal GNSS, fallos debidos al desgaste del sistema y fallos relativos a la integridad y su capacidad de avisar a tiempo acerca de los errores.

5.3.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200

Los valores establecidos por la OACI en relación a la continuidad son los siguientes:

	Continuidad
Aproximaciones de no precisión (NPA)	de $1 - 1 \times 10^{-4} / h$ a $1 - 1 \times 10^{-8} / h$
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	$1 - 8 \times 10^{-8} / 15 s$
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	$1 - 8 \times 10^{-8} / 15 s$

Tabla 5.5: Requisitos de continuidad de la OACI [24]

Y, a continuación, en la tabla 5.6 se muestran los valores de continuidad que ofrece el sistema EGNOS.

	Continuidad (EGNOS)
Aproximaciones de no precisión (NPA)	de $1 - 2.5 \times 10^{-3} / h$ a $1 - 1 \times 10^{-3} / h$
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	de $1 - 1 \times 10^{-3} / 15 s$ a $1 - 1 \times 10^{-4} / 15 s$
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	de $1 - 1 \times 10^{-3} / 15 s$ a $1 - 1 \times 10^{-4} / 15 s$

Tabla 5.6: Valores de continuidad ofrecidos por EGNOS [18]

De estas dos tablas, es posible apreciar que la continuidad ofrecida por EGNOS no lo suficientemente buena como para cumplir los requisitos impuestos por la OACI. Sin embargo, la OACI ofrece la opción de suplir esta falta de continuidad haciendo uso de sistemas adicionales que aumenten la continuidad final.

5.4 Disponibilidad

La disponibilidad es el último de los parámetros y refleja el porcentaje de tiempo en el cual el supuesto usuario del sistema puede hacer uso de los servicios. El valor de la disponibilidad se ve influenciado por una amplia serie de factores como son la meteorología, el terreno, el entorno, e incluso el domino técnico de la señal de transmisión [24].

La forma de expresar la disponibilidad es mediante un valor que indique la cantidad del tiempo que el servicio se encuentra disponible de manera porcentual.

5.4.1 Valores OACI/EGNOS para LPV-200

La OACI establece los siguientes valores en cuanto a los requisitos de disponibilidad se refiere:

	Disponibilidad
Aproximaciones de no precisión (NPA)	de 0.99 a 0.99999
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	de 0.99 a 0.99999
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	de 0.99 a 0.99999

Tabla 5.7: Requisitos de disponibilidad de la OACI [24]

De la misma manera que en los anteriores parámetros, en la tabla 5.8 se pueden observar los valores ofrecidos por el sistema EGNOS.

	Disponibilidad
Aproximaciones de no precisión (NPA)	0.999
Aproximaciones con guiado vertical (APV-I)	0.99
Aproximaciones de CAT I (LPV-200)	0.99

Tabla 5.8: Valores de disponibilidad ofrecidos por EGNOS [18]

Finalmente, se ve como la disponibilidad ofrecida por EGNOS sí que cumple con los requisitos expuestos por la OACI.

Capítulo 6

Validación de procedimientos SBAS

La validación de los procedimientos SBAS tiene un diseño que se ha de seguir metódicamente con el fin de proporcionar un servicio eficiente y útil. Este proceso se divide en 3 pasos: la toma de datos a largo plazo, la toma de datos a corto plazo y los ensayos de vuelo. Una vez un procedimiento haya superado esas 3 etapas se encuentra disponible para ser implementado [24].

Por otra parte, resulta fundamental remarcar el hecho de que para poder operar en un procedimiento SBAS no únicamente el procedimiento en sí ha de estar validado, sino que cada uno de los componentes implicados en la operación ha de haber llevado a cabo una aprobación por parte de las diferentes compañías que regulan este sector.

Por definición, las 3 etapas tienen carácter secuencial, de manera que si no se ha cumplido una fase anterior no se puede comenzar con la siguiente, por lo que el proceso se hace más lento, pero más seguro. A continuación, se pasa a explicar las 3 fases en detalle.

6.1 Toma de datos a largo plazo

Esta fase es la primera de las 3 fases que constituyen este proceso. Su progreso consiste en la obtención y el estudio de los resultados de la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad del servicio durante un periodo de tiempo de 6 meses.

Los datos son de libre acceso, ya que el segmento de tierra del sistema EGNOS los pone a disposición de cualquier persona a través de la web de la ESSP (*European Satellite Services Provider*) en forma de informes mensuales en los cuales se aporta toda la información necesaria relativa al sistema EGNOS.

En particular, para este trabajo se ha realizado el estudio desde el mes de septiembre de 2020 hasta el mes de febrero de 2021, cumpliendo así con los 6 meses reglamentados.

6.2 Toma de datos a corto plazo (sobre el terreno)

Esta etapa es parecida a la anterior, basándose en la obtención de datos con el fin de determinar que los resultados de los principales parámetros son suficientemente buenos. La diferencia principal de esta fase es que los datos utilizados en esta parte son datos obtenidos directamente desde el lugar en el que se pretende realizar la validación. Para ello, se ha de usar la estación GNSS más cercana al aeropuerto en cuestión.

Además, el estudio de esta fase tiene una duración mínima de 36 horas, con las que la obtención de datos es suficiente para el posterior estudio.

Para este trabajo de final de grado, el lugar donde se quiere realizar la validación es el aeropuerto de Gran Canaria, en el cual no hay estaciones GNSS. Es por ello, que se toma la estación más cercana, que es la estación AGÜIMES, situado en la parte este de la isla de Gran Canaria. Esta estación forma parte del conjunto de estaciones situadas en las Islas Canarias, conocidas como GrafCan.

6.3 Ensayos de vuelo

Para finalizar el proceso de validación, una vez se hayan obtenido resultados positivos en las dos fases anteriores, se pasa a la tercera fase, los ensayos de vuelo. El propósito de esta fase es la comprobación del correcto funcionamiento de todos los aspectos estudiados en las fases anteriores durante un aterrizaje real.

La fase de ensayos de vuelo se compone de un mínimo de 5 aproximaciones de una aeronave con sistema SBAS embarcado, de tal forma que en esta se almacenen los datos brutos que más tarde se procesan haciendo uso del *software* PEGASUS de EUROCONTROL.

En el caso de este trabajo la aeronave elegida sería un dron, en un intento de ahorrar recursos. Sin embargo, la validación de las dos primeras fases no resulta lo suficientemente bueno, por lo que esta parte de la validación no se elabora, dejándola como estudio en el momento en el que el sistema EGNOS demuestre mejores prestaciones en la isla de Gran Canaria.

DOCUMENTO II
VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS
SBAS LPV-200

Capítulo 7

Formato de los mensajes

Para que los sistemas de los que ya hemos hablado funcionen correctamente, han de ser capaces de transmitir los mensajes que transportan los datos de manera eficiente. Es por ello, que resulta de una gran importancia el uso de un formato estandarizado y común a todos los sistemas. Es cierto que existen muchos tipos de formatos que han tratado de llegar a ser los más influyentes, sin embargo, actualmente, se puede concluir que existen 5 formatos principales, los cuales se explicarán a continuación [2].

Además, se explicará de manera mucho más detallada el formato de mensajes RINEX (*Receiver Independent Exchange*), el cual ha sido en el desarrollo de este trabajo de fin de grado, durante la segunda y tercera fase de la validación de procedimientos SBAS.

7.1 RTCM

En primer lugar, está el estándar RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), el cual se trata de un protocolo de datos binarios que se puede utilizar en una gran cantidad de aplicaciones diversas en el ámbito de las correcciones diferenciales. Su origen se remonta al año 1947, en el cual se creó el comité técnico homónimo por parte del gobierno de los Estados Unidos. Actualmente, es una organización independiente.

A lo largo de los años, las versiones de este estándar han ido evolucionando, de manera que actualmente una gran variedad de ellas. Las principales en cuanto a su uso actual son la versión RTCM 10402.3, la cual es la referencia para las operaciones marítimas y terrestres de los sistemas GNSS y define los 64 tipos de mensajes que pueden ser transmitidos; la versión RTCM 1041.2 es la encargada del establecimiento de los requisitos de funcionamiento referentes a los emisores de las correcciones diferenciales del GNSS; y la versión RTCM 10403.1, en la cual se define el proceso de obtención de los resultados relativos a la integridad en zonas de área amplia.

7.2 NTRIP

El formato NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) es un protocolo propio de Internet, y hace posible la transmisión de datos GNSS a todo tipo de receptores a través de los servicios que proporciona Internet. Se puede decir que es un subformato del protocolo RTCM, ya que los mensajes tienen el formato RTCM con

la diferencia de su forma de transmisión. Este tipo de mensajes contiene observables tanto GPS como GLONASS, datos relativos al tipo de antenas, las coordenadas de las estaciones de referencia y las correcciones tanto de código como de fase.

7.3 RTCA

La necesidad de crear un estándar destinado a la aviación directa, con la necesidad de cumplir con los requerimientos de las operaciones a tiempo real, hace que se desarrolle el estándar RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*), el cual se centra en la transmisión de correcciones en el ámbito local.

Cabe destacar que, para poder proceder con este trabajo, se ha tenido que consultar en repetidas ocasiones un documento de gran importancia en este ámbito, el estándar RTCA MOPS DO-229-C – *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentations System airborne equipment*. En este documento se recogen los diferentes requerimientos relacionados con el equipamiento del que disponen las aeronaves que quieren hacer uso de los sistemas GNSS.

7.4 NMEA

En cuarto lugar, el estándar NMEA (*National Marine Electronics Association*) se utiliza a la hora de transmitir datos entre dispositivos electrónicos marítimos sin que el ritmo de datos o el formato de los mensajes se vea alterado de manera que sean siempre compatibles con receptores GNSS. Este estándar emplea el código ASCII codificado para la creación de sus mensajes para emitir los mensajes relativos a todos los datos de interés de los sistemas.

7.5 RINEX

El estándar RINEX es un formato especialmente creado con el fin de poder intercambiar información entre los sistemas de navegación. Cada uno de los ficheros RINEX contiene información relativa a una única estación durante un periodo determinado de tiempo, normalmente un día. Es de gran utilidad a la hora de postprocesar la información bruta obtenida en cada una de las estaciones [25].

En el momento de su creación, los archivos RINEX, desarrollados por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, fueron pensados como un formato especial destinado al intercambio de datos GPS únicamente, en el contexto de la campaña europea EUREF 89. El formato empleado en este protocolo usa el código ASCII para facilitar el entendimiento de los datos. Por otra parte, al igual que con otros formatos, existen varias versiones que se han ido creando a lo largo de los años. El formato original es el RINEX 1, diseñado en 1989, con el fin de dar servicio únicamente al

sistema GPS. Más adelante, en 1990, se introdujo la versión RINEX 2, en la cual existía la posibilidad de recepción de otros sistemas, como son el GLONASS o el sistema de aumentación SBAS. Finalmente, se desarrolló el RINEX 3, mucho más actual y moderno, dando servicio a los nuevos sistemas QZSS e IRNSS.

En particular, durante el proceso de validación de este trabajo se ha empleado el formato RINEX 2.11, en el cual se incluyen nuevos códigos de observación de dos caracteres y modificaciones en los archivos de navegación. Este formato se organiza en 7 tipos de ficheros ASCII diferentes, como se ve a continuación [25]:

- Fichero de observación
- Fichero de navegación
- Fichero de navegación GLONASS
- Fichero de navegación GEO
- Fichero de datos meteorológicos
- Fichero de transmisión de datos SBAS
- Fichero de fecha de reloj de satélite y receptor

El desarrollo de este trabajo ha requerido del uso de los archivos RINEX de observación (.o) y de navegación (.n).

Por otra parte, los ficheros de formato RINEX adquieren su nombre siguiendo una estructura predefinida para sus tipos. La estructura es la siguiente:

ssssdddf.yyt

Donde:

- ssss: esta parte del nombre indica el diminutivo de la estación a la que pertenecen los datos. En el caso de este trabajo, la estación es AGÜIMES y su diminutivo es AGUI.
- ddd: indican el día al que corresponden las mediciones, desde el 1 al 365 o 366, de manera que quedan de la siguiente forma:
 - 001: 1 de enero
 - 095: 5 de abril
 - 096: 6 de abril
 - 365: 31 de diciembre
- f: indica con una letra desde la “a” a la “x” la hora del día en la cual se almacenan los datos.
 - a: primera hora – de 00:00 a 01:00
 - x: vigesimocuarta hora – de 23:00 a 24:00
- yy: estos 2 números indican el año al que pertenece el archivo utilizando únicamente los dos últimos dígitos del año real.
 - 98: 1998
 - 17: 2017
- t: esta letra indica el tipo de archivo, pudiendo encontrarse las siguientes letras:
 - O: archivo de observación

- N: archivo de mensaje de navegación GPS
- M: archivo de datos meteorológicos
- G: archivo de mensaje de navegación GLONASS
- L: archivo de mensaje de navegación Galileo
- P: archivo de mensaje de navegación mixto
- H: archivo de mensaje de navegación de carga útil SBAS
- B: archivo de emisión de datos SBAS
- C: archivo de reloj
- S: archivo de resumen

7.5.1 Fichero de observación

En este fichero, con extensión “.o”, se encuentra la información más relevante recogida por los receptores GNSS, la cual es la necesaria para que el sistema ofrezca los servicios principales de posicionamiento y navegación. En cada uno de estos ficheros se almacenan los datos correspondientes a un cierto periodo de tiempo, 1 hora normalmente, siendo posible también la concatenación posterior de manera sencilla para así construir ficheros de mayor duración de más utilidad, como puede ser 1 día. La cabecera en la que se detallan los diferentes campos mostrados tiene una estructura común a todos los subtipos, exponiendo los campos comunes de versión RINEX, tipo de datos, institución proveedora, fabricante de la antena..., junto con los datos de interés técnico [25].

Cada uno de los observables se compone de 3 cantidades que lo definen: tiempo, fase y pseudodistancia. Además, desde la versión RINEX 2.11, se incluye una cuarta cantidad que corresponde a la SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). A continuación, se pasa a describir cada una de estas medidas:

- Tiempo: se trata de la medida del tiempo del dispositivo receptor expresado en forma de la época en la que se observa. Si se da una situación en la cual únicamente se emplea un único satélite, este parámetro pierde importancia, ya que el tiempo es expresado por defecto por el satélite.
- Fase: esta medida refleja la diferencia entre la señal portadora en el momento de recepción y una señal de referencia creada por el receptor a partir de ciertos datos obtenidos.
- Pseudodistancia: se obtiene al sumar la distancia real entre el dispositivo emisor y el dispositivo receptor y las diferentes desviaciones que se puedan dar debido a errores de varios tipos explicados previamente en este trabajo, como son los ionosféricos o del reloj del satélite o del receptor.
- SNR: a partir de estas medidas se puede determinar la intensidad de la señal enviada en función del ruido que se ve implementado junto con la señal. Dentro del fichero de observación, esta medida aparece en forma de SS (*Signal Strength*), donde su valor va desde el 1 (mínima intensidad) al 9 (máxima intensidad).

Por otra parte, existe una quinta medida que se emplea cuando los satélites son cercanos a la superficie terrestre. Este parámetro es la desviación Doppler, dependiente de las velocidades relativas de los componentes del proceso.

A continuación, a modo de resumen, se expone una tabla en la cual se encuentra la cabecera con los diferentes campos que se indican en un fichero de observación:

REGISTRO DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION / TYPE	Versión del formato RINEX (2.11) Tipo de archivo ('O' para datos de observación) Sistema satelital: blanco o 'G': GPS 'R': GLONASS, 'S': GEO, 'E': Galileo, 'M': Mixto
PGM / RUN BY / DATE	Programa que ha creado el fichero / Agencia que ha creado el fichero / Fecha de creación
* COMMENT	Comentarios
MARKER NAME	Nombre de la antena de observación
* MARKER NUMBER	Número de la antena de observación
OBSERVER / AGENCY	Nombre del observador / agencia
REC # / TYPE / VERS	Número del receptor, tipo y versión (<i>software</i>)
ANT # / TYPE	Número y tipo de antena
APPROX POSITION XYZ	Posición aproximada de la antena (WGS84)
ANTENNA: DELTA H/E/N	Altura de la antena y excentricidades [m]
* WAVELENGTH FACT L1/2	Factores de longitud de onda para L1 y L2 (GPS): 1 – Ambigüedades de ciclo completo 2 – Ambigüedades de ciclo medio (cuadratura) 0 (en L2) – Instrumento de frecuencia única Número de satélites con factores válidos Lista de PRNs (número de los satélites)
# / TYPES OF OBSERV	Tipos de observaciones diferentes en el fichero (número) Código de las observaciones: C: Pseudodistancia (C/A, L2C o todas) [m] P: Pseudodistancia en modo P [m] L: fase portadora [ciclos completos] D: frecuencia Doppler [Hz] S: SNR o intensidad de señal [depende del receptor] Códigos de frecuencia. GPS: L1/ L2/L5 – GLONASS: G1/G2 - Galileo: E2-L1-E1/E5a/E5b/E6/E5a+b - SBAS: L1/L5
* INTERVAL	Intervalo de la observación [s]
TIME OF FIRST OBS	Tiempo de la primera observación (año, mes, día, hora, minuto, segundo) Sistema temporal: GPS: sistema GPS GLONASS: sistema UTC Galileo: sistema Galileo
* TIME OF LAST OBS	Tiempo de la última observación (año, mes, día, hora, minuto, segundo) Mismo sistema temporal anterior
* RCV CLOCK OFFS APPL	Época, código y fase se corrigen con la desviación de reloj en tiempo real: 1=SI, 0=NO
* LEAP SECONDS	Salto de segundos desde el 06/01/1980
* # OF SATELLITES	Número de satélites con observaciones guardadas en el fichero
* PRN / # OF OBS	Número del PRN / Número de observaciones para cada tipo de observación indicada en el registro "# / TYPES OF OBSERV"
END OF HEADER	Último registro del encabezado

Tabla 7.1: Estructura de las cabeceras de los ficheros RINEX de observación [26]

Se ha de tener en cuenta que aquellos campos contenidos en Tabla 7.1, que se encuentran acompañados por un “*”, son campos opcionales y puede que aparezcan o no el mensaje dependiendo de su finalidad. Por otra parte, la siguiente tabla muestra la parte secundaria o final del fichero, donde se encuentran los datos registrados que se quieren transmitir.

REGISTRO DE DATOS	DESCRIPCIÓN
EPOCH / SAT or EVENT FLAG	Época: Año, mes, día, hora, minuto, segundo Marcador de época: 0=OK, 1=fallo entre épocas, >1=evento Número de satélites en la época actual Listado de PRNs en la época actual Desviación de reloj del receptor Si el marcador de época 2-5: Evento: 2: se ha producido movimiento de la antena 3: nueva ocupación del sitio 4: continúa la información del encabezado a partir del número 5: evento externo Número de satélites limitado a 999
OBSERVATIONS	Fase: en ciclos completos Código: en metros Las observaciones nulas aparecen en blanco o como 0.0 Intensidad de señal de 1 a 9: si es 0, no se ha registrado ese dato

Tabla 7.2: Estructura de los datos de los ficheros RINEX de observación [26]

A modo de demostración, a continuación, se muestra, haciendo uso del Bloc de notas que se haya en todos los ordenados Windows, la estructura de un fichero de observación real, en concreto uno de los utilizados en este trabajo. El fichero tiene el nombre de AGUI0950.21o, haciendo referencia al lugar de obtención y a la época del fichero. En la imagen se puede observar que algunos de los campos previamente mencionadas no se encuentran expuestos, esto se debe a que, como se ha comentado antes, existen campos opcionales.


```

agui0950.21o: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2019Feb25 20210424 15:24:02UTC PGM / RUN BY / DATE
AGUI MARKER NAME
31322M001 MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
495473 LEICA GRX1200+GNSS 9.20/6.405 REC # / TYPE / VERS
09260119 LEIAX1203+GNSS NONE ANT # / TYPE
5437265.7186 -1502353.2930 2967249.5341 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
5 C1 L1 P2 L2 C2 # / TYPES OF OBSERV
1.0000 INTERVAL
18 LEAP SECONDS
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|=+ COMMENT
Spider V7.5.2.8679 2021 04 05 01:04 COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1-9] COMMENT
LX: >= 25dBHz -> 1; 26-27dBHz -> 2; 28-31dBHz -> 3 COMMENT
32-35dBHz -> 4; 36-38dBHz -> 5; 39-41dBHz -> 6 COMMENT
42-44dBHz -> 7; 45-48dBHz -> 8; >= 49dBHz -> 9 COMMENT
Product COMMENT
2021 4 5 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
21 4 5 0 0 0.0000000 0 13G01G03G04G06G07G09G17G19R03R04R05R18
R19
23454028.600 123251897.935 6 23454026.740 96040512.84446 23454027.220
23071018.400 121239154.065 8 23071015.560 94472112.65448 23071016.300
21404650.480 112482255.693 8 21404646.140 87648527.94647 21404646.520
22192599.880 116622907.386 8 22192597.280 90874980.42147 22192598.060
24063060.080 126452244.962 7 24063055.280 98534204.42647 24063055.660
20316444.800 106763684.981 9 20316441.580 83192484.49449 20316441.860
20779504.400 109197055.417 9 20779498.960 85088608.48549 20779499.540
20754632.360 109066333.199 9 20754624.900 84986737.19448
22224795.640 118971161.169 7 22224796.020 92533164.197 6
19633569.800 105136926.689 9 19633569.880 81773186.156 7
21132891.420 112967436.605 8 21132893.000 87863576.977 7
20112490.980 107361870.548 8 20112494.160 83503711.875 7
19423466.240 103902453.317 6 19423467.620 80813023.392 6
21 4 5 0 0 1.0000000 0 13G01G03G04G06G07G09G17G19R03R04R05R18
R19
23454501.460 123254382.871 6 23454499.620 96042449.15546 23454500.080
23071433.960 121241337.863 8 23071431.120 94473814.31548 23071431.880
21405020.880 112484202.116 8 21405016.520 87650044.63748 21405016.900

```

Figura 7.1: Archivo RINEX de observación AGUI0950.21o de la estación de Agüimes

Es importante reconocer dentro del archivo ciertos sectores que recuerdan la proveniencia del propio fichero. Esto se debe a que ha sido editado previamente, como se explicará en capítulos posteriores destinados al estudio del *software* utilizado.

7.5.2 Fichero de navegación

El fichero complementario al de observación es el fichero de navegación, con extensión “.n”. La estructura de estos ficheros es muy parecida a los de observación tanto en su cabecera como en los distintos datos que se aportan en el mensaje. La mayor diferencia entre ambos ficheros es la dependencia del sistema satelital empleado por parte del fichero de navegación [25].

Al igual que con el fichero de observación, en esta ocasión también se presenta uno de los ficheros de navegación utilizados en este trabajo, correspondiente al fichero del día 5 de abril.


```

agui0950.21n: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  2.11 N: GPS NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
teqc 2019Feb25 20210424 15:20:06UTC PGM / RUN BY / DATE
  1.1176D-08 1.4901D-08 -5.9605D-08 -5.9605D-08 ION ALPHA
  8.8064D+04 1.6384D+04 -1.9661D+05 -1.3107D+05 ION BETA
-9.313225746155D-10-3.552713678801D-15 233472 2152 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
18 LEAP SECONDS
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|=+ COMMENT
  2.10 NAVIGATION DATA COMMENT
Spider V7.5.2.8679 2021 04 05 01:04 COMMENT
END OF HEADER
1 21 4 4 23 59 44.0 7.244795560837D-04-9.549694368616D-12 0.000000000000D+00
2.100000000000D+01-3.753125000000D+01 4.139458109620D-09 2.322198289931D+00
-2.130866050720D-06 1.064548455179D-02 3.602355718613D-06 5.153688671112D+03
8.638400000000D+04-8.195638656616D-08-2.559542991011D+00-1.359730958939D-07
9.838955591079D-01 3.236250000000D+02 8.270246049630D-01-7.941402202505D-09
2.392956839625D-11 1.000000000000D+00 2.152000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 4.656612873077D-09 2.100000000000D+01
7.911000000000D+04
2 21 4 4 6 0 0.0-5.924771539867D-04-3.524291969370D-12 0.000000000000D+00
1.300000000000D+01-6.456250000000D+01 4.725911217918D-09-5.860242515423D-01
-3.432855010033D-06 2.028364024591D-02 4.854053258896D-06 5.153646823883D+03
2.160000000000D+04-2.719461917877D-07-2.641713327929D+00 1.378357410431D-07
9.626545620608D-01 2.948125000000D+02-1.528237697737D+00-8.668218143271D-09
1.725071890890D-10 1.000000000000D+00 2.152000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-1.769512891769D-08 1.300000000000D+01
1.434000000000D+04
3 21 4 5 0 0 0.0-1.277364790440D-04-1.080024958355D-11 0.000000000000D+00
8.000000000000D+00-8.906250000000D+01 4.294464783783D-09 1.234685267312D+00
-4.604458808899D-06 3.348791389726D-03 8.052214980125D-06 5.153627101898D+03
8.640000000000D+04-5.029141902924D-08-1.521334065899D+00 6.705522537231D-08
9.684698355131D-01 2.289062500000D+02 8.265389044573D-01-7.949974012433D-09
-3.643008811283D-11 1.000000000000D+00 2.152000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 1.862645149231D-09 8.000000000000D+00
7.914000000000D+04
4 21 4 5 0 0 0.0-1.901136711240D-04-2.046363078989D-12 0.000000000000D+00
9.900000000000D+01-1.218750000000D+01 4.463757363737D-09-2.291657575319D+00
-6.742775440216D-07 1.166785135865D-03 9.173527359962D-06 5.153760320663D+03
8.640000000000D+04 7.450580596924D-09-4.408000841557D-01 2.421438694000D-08
9.606511250096D-01 2.030937500000D+02-2.968084432447D+00-7.827111403458D-09
2.289381045850D-10 1.000000000000D+00 2.152000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-4.190951585770D-09 3.550000000000D+02
7.914000000000D+04
5 21 4 4 10 0 0.0-3.811297938228D-05-1.023181539495D-12 0.000000000000D+00

```

Figura 7.2: Archivo RINEX de navegación AGUI0950.21n de la estación de Agüimes

Además, en la tabla siguiente se encuentran recogidos los diferentes campos que pueden encontrarse en la cabecera del mensaje del fichero de navegación.

REGISTRO DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION / TYPE	Versión del formato RINEX (2.11) Tipo de archivo ('N' para datos de navegación)
PGM / RUN BY / DATE	Programa que ha creado el fichero / Agencia que ha creado el fichero / Fecha de creación
* COMMENT	Comentarios
* ION ALPHA	Parámetros ionosféricos A0-A3 del almanaque
* ION BETA	Parámetros ionosféricos B0-B3 del almanaque
DELTA-UTC: A0,A1,T,W	Parámetros del almanaque para computar el tiempo UTC: A0, A1: términos polinómicos T: tiempo de referencia para los datos UTC W: número de la semana de referencia UTC
* LEAP SECONDS	Error en el tiempo por el salto de segundos
END OF HEADER	Último registro del encabezado
REGISTRO DE DATOS	DESCRIPCIÓN
PRN / EPOCH / SV CLK	Número del PRN Época: Tiempo de reloj, año, mes, día, hora, minuto, segundo Bias de reloj [s] / Error de reloj satélite [s/s] / Deriva reloj satélite [s/s ²]
EFEMÉRIDES 1	Dilución de la precisión IODE, Efemérides [s] (número de identificación) Coeficiente Crs de corrección de la distancia geocéntrica [m] Diferencia media de movimiento Δn [rad/s] Anomalía media M_0 en el tiempo de referencia [rad]
EFEMÉRIDES 2	Coeficiente Cuc de corrección para el perigeo [rad] Excentricidad "e" Coeficiente Cus de corrección para el perigeo [rad] Raíz cuadrada del semieje mayor \sqrt{a} [en \sqrt{m} , parámetro kepleriano]
EFEMÉRIDES 3	t_{0E} , tiempo de referencia de las Efemérides [s de la semana GPS] Coeficiente Cic de corrección del ángulo de inclinación [rad] Ω_0 , longitud del nodo de ascenso [rad] Coeficiente Cis de corrección del ángulo de inclinación [rad]
EFEMÉRIDES 4	Inclinación i_0 en el tiempo de referencia [rad] Coeficiente Crc de corrección de la distancia geocéntrica [m] Argumento del perigeo ω [rad] $\dot{\Omega}_0$, tasa de variación del nodo de ascenso [rad/s]
EFEMÉRIDES 5	Tasa de variación del ángulo de inclinación, IDOT [rad/s] Códigos en el canal L2 Semana GPS Indicador de datos de código P en el canal L2
EFEMÉRIDES 6	Precisión del satélite [m] Salud del satélite Retraso combinado ionosfera – banda L1 (TGD) [s] Dilución de la precisión IODC, Reloj [s] (número de identificación)
EFEMÉRIDES 7	Tiempo de transmisión del mensaje [s de la semana GPS] Intervalo de ajuste [h] Espacio reservado Espacio reservado

Tabla 7.3: Estructura de cabeceras y datos de los ficheros RINEX de navegación [26]

Capítulo 8

Software

En este capítulo se detalla toda la información correspondiente a la obtención y el uso de las diferentes aplicaciones electrónicas usadas a lo largo del trabajo. De manera detallada se muestra todo el proceso que se ha seguido para obtener los resultados finales, que se analizarán en el siguiente capítulo.

8.1 Obtención de datos

El primero de los pasos es la obtención de todos los ficheros de datos GNSS desde sus respectivas bases de datos. Estos ficheros son necesarios para la parte de validación correspondiente a la campaña de corto plazo. Es de vital importancia la obtención de estos ficheros a través de organismos oficiales para así garantizar la integridad de estos y evitar imprecisiones que se puedan dar más adelante.

Por ese motivo, se utiliza como fuente de datos el IGS (*International GNSS Service*), un organismo internacional consolidado por la IAG (*International Association of Geodesy*) en el año 1994. Este organismo cuenta con más de 505 estaciones en su red mundial desde 2017 y continúa expandiendo su red para proporcionar cada vez mejores servicios. Entre estos servicios se encuentran las soluciones para efemérides, datos temporales de los relojes, parámetros atmosféricos y la actualización de coordenadas y nivel de rotación del globo terrestre de manera diaria.

En el ámbito nacional, es el IGN (instituto Geográfico Nacional) el que se encarga de almacenar y proveer de estos datos a los diferentes usuarios que puedan requerirlos. Este instituto fue creado en el año 1870 y está asociado al Ministerio de Fomento. Desde este organismo se ha ido desarrollando una red de estaciones GNSS denominada la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS), en la cual se incorporan una cantidad del orden de 100 estaciones permanentes que funcionan como base para la recepción de las señales GNSS. A través de dicha red se trata de satisfacer los objetivos siguientes [27]:

- Soporte como colaboración en la creación de los futuros Sistemas de Referencia Globales (ITRF) para el territorio nacional.
- Desarrollo de un posicionamiento extremadamente preciso ofreciendo coordenadas y campos de velocidades.
- Pasar a ser puntos de referencia para la Red Europea EUREF.
- Comenzar la definición de una red de apoyo para los sistemas basados en correcciones DGNSS y RTK.
- Proporción de ficheros GNSS a usuarios públicos de manera regulada.

- Servir como base para estudios de cada una de las capas de la atmósfera y para estudios meteorológicos.

Asimismo, dentro de la red ERGNSS, 27 de sus estaciones pasan a formar parte al mismo tiempo de la red europea EUREF, y 3 de estas, Melilla, Yebes y Garafia, a su vez están integradas dentro de la red mundial del IGS.

El mantenimiento de estas estaciones corre a cuenta tanto de las comunidades autónomas donde se sitúan como del estado, con el fin de asegurar su correcto rendimiento y eficiencia, así como distribuir de manera correcta el posicionamiento de las diferentes estaciones. Cada una de estas estaciones es capaz de obtener señales de GPS, GLONASS, GALILEO y antenas geodésicas haciendo uso de los receptores multifrecuencia con los que se encuentran equipadas.

En el desarrollo de la parte práctica de este proyecto se ha empleado la estación situada en AGÜIMES, cuyo código es AGUI. Esta estación es la más cercana al aeropuerto de Gran Canaria, en el cual se basa este trabajo, y se sitúa en el pueblo de Agüimes.

Asimismo, dentro de la página web del IGN, en el apartado referido a la red ERGNSS y sus estaciones, se puede observar e incluso descargar la reseña oficial de la estación AGUI, así como cada una de las reseñas de las demás estaciones permanentes de la red. Además, la Reseña de Estación Permanente de AGUI se puede observar en la figura 8.1. Dentro de esta se facilitan datos tales como las diferentes fechas relevantes, como la de instalación, el código de la estación, información relativa al tipo de receptor, las coordenadas de la estación e información adicional de gran valor para la obtención de los datos GNSS [27].





Gobierno de Canarias		REPCAN		GRAFCAN							
RED CANARIA DE ESTACIONES PERMANENTE GNSS											
AGÜIMES											
SITUACIÓN											
	ISLA	GRAN CANARIA									
	UBICACIÓN	Oficinas Municipales. Joaquín Artilles, 1 35260-Agüimes									
	FECHA INSTALACIÓN/CÁLCULO	(14/12/2009)-(20-22/02/2018)									
	CÓDIGO ESTACIÓN	AGUI									
COORDENADAS REGCAN 2001 (ITRF93/WGS84)											
GEOGRÁFICAS		U.T.M.		CARTESIANAS							
LATITUD	27° 54' 13,95085" N	X	456.125,197	X	5.437.265,750						
LONGITUD	15° 28' 45,00940" W	Y	3.086.634,100	Y	- 1.502.353,306						
h(elipsoidal)	329,082	HUSO	28	Z	2.967.249,565						
INSTRUMENTACIÓN											
RECEPTOR	LEICA GRX 1200+ GNSS										
ANTENA	LEIAX1203+ GNSS										
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	TUBO DE GALVANIZADO										
											
						INFORMACIÓN ADICIONAL					
						DIRECCIÓN DE RINEX	ftp://195.53.241.146				
						USUARIO/PASSWORD RINEX	Solicitar "Alta estaciones GNSS" en gnss@grafcan.com				
						CONEXIÓN TIEMPO REAL/DIRECCIÓN IP	195.53.241.146				
						USUARIO Y CONTRASEÑA NTRIP	Adquirir conexión anual en http://tiendavirtual.grafcan.es , y enviar email a gnss@grafcan.com				
						PUERTO	2101				
FORMATO	CRM+; RTCM2.x; RTCM3.x										
UBICACIÓN											
											

Figura 8.1: Estación permanente de Agüimes de ERGNSS [27]

La red ERGNSS, gracias a su compleja red de estaciones distribuidas a lo largo de todo el territorio español, es capaz de proveer a la ciudadanía de servicios a tiempo real de posicionamiento. Sin embargo, posteriormente en este proyecto, se utilizará una opción diferente, se opta por el servicio post-proceso, a través del cual se pueden obtener los registros históricos en diferentes formatos. Los ficheros RINEX se pueden obtener con una duración horaria o diaria, y con mediciones en periodos de 1, 5, 10 o 30 segundos.

A la hora de obtener los datos para este trabajo, se precisa de datos con una frecuencia de 1 segundo. Para obtener estos datos, se procede a través del servidor FTP del IGN, compuesto por una serie de archivos ordenados en diferentes niveles de carpetas en función de la fecha y el tipo de datos.

Navegando durante cierto tiempo por el entorno del servidor FTP referente al IGN, se observa que los ficheros no se encuentran ordenados de manera idónea, por lo que se descarta este método de extracción de datos para pasar a utilizar un servicio del mismo tipo, FTP, pero directamente proporcionado por el organismo conocido como Cartográfica de Canarias, S. A. o GRAFCAN. [28].

Este organismo se encarga de los diferentes ámbitos relacionados con el entorno cartográfico de las Islas Canarias, entre los que se encuentran una gran variedad de servicios, de los cuales se pueden destacar [28]:

- El Sistema de Observación Meteorológica de Canarias.
- El visor cartográfico, donde se dispone de mapas y cartas con gran precisión de la zona referente a las Islas Canarias.
- El espacio de estadísticas, en el cual se pueden observar datos históricos de diferentes temas relacionados con los servicios ofrecidos.
- La Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias.
- El portal de Datos Abiertos del Sistema de Información Territorial de Canarias.
- Red de Estaciones Permanentes de Canarias.

Es el último de los servicios mencionados del que se hace uso en este trabajo dando reemplazo a los servicios proporcionados por el IGN estatal.

8.1.1 Red de Estaciones Permanentes de Canarias

La Red de Estaciones Permanentes de Canarias se compone por 17 estaciones distribuidas a lo largo del territorio de las Islas Canarias hallándose por lo menos una estación en cada una de las islas. La distribución alrededor de las islas es la siguiente [28]:

- Gran Canaria: 4 estaciones.
- Fuerteventura: 4 estaciones.

- Tenerife: 3 estaciones.
- Lanzarote: 3 estaciones.
- El Hierro: 1 estación.
- La Gomera: 1 estación.
- La Palma: 1 estación.

La disposición de las estaciones responde a criterios relacionados con el tamaño de las islas y la intención de cubrir el máximo espacio para ofrecer servicio a la mayor área posible.

La Red de Estaciones Permanentes de Canarias también colabora con la red estatal ERGNSS tomando estas las estaciones que proporcionen mejor servicio a la red nacional. La red ERGNSS hace uso de 6 de las 17 estaciones contenidas en la Red de Estaciones Permanentes de Canarias.

Una vez conocida la infraestructura física existente en las Islas Canarias, se pasa a la extracción de datos de estas estaciones. Con este fin, la página del GRAFCAN, proporciona a los usuarios que se hayan dado de alta en el servicio gratuito correcciones en tiempo real para que sean procesados y ofrezcan una mejora en el posicionamiento de manera precisa al tiempo que se realizan las propias mediciones.

Además, este organismo también proporciona el servicio de post-proceso, que es el servicio utilizado en este proyecto. Los datos, como es habitual, se ofrecen en ficheros RINEX, configurados en series de 30 segundos por días, o de 1 segundo por horas, que es la opción óptima para el desarrollo de la evaluación posterior. El servicio se ofrece, al igual que en el IGN, a través de un servidor FTP.

El servidor FTP ofrecido por GRAFCAN es ampliamente más sencillo y directo que el ofrecido por el IGN. Para proceder a través del servidor simplemente se ha de avanzar por las carpetas referentes al año, mes y día de las mediciones buscadas, y obtener una carpeta en la cual se encuentran los 24 ficheros del día seleccionado. En la figura 8.2 se puede observar el entorno del servidor FTP una vez se ha seleccionado el día y se dispone finalmente del archivo comprimido con los datos buscados.

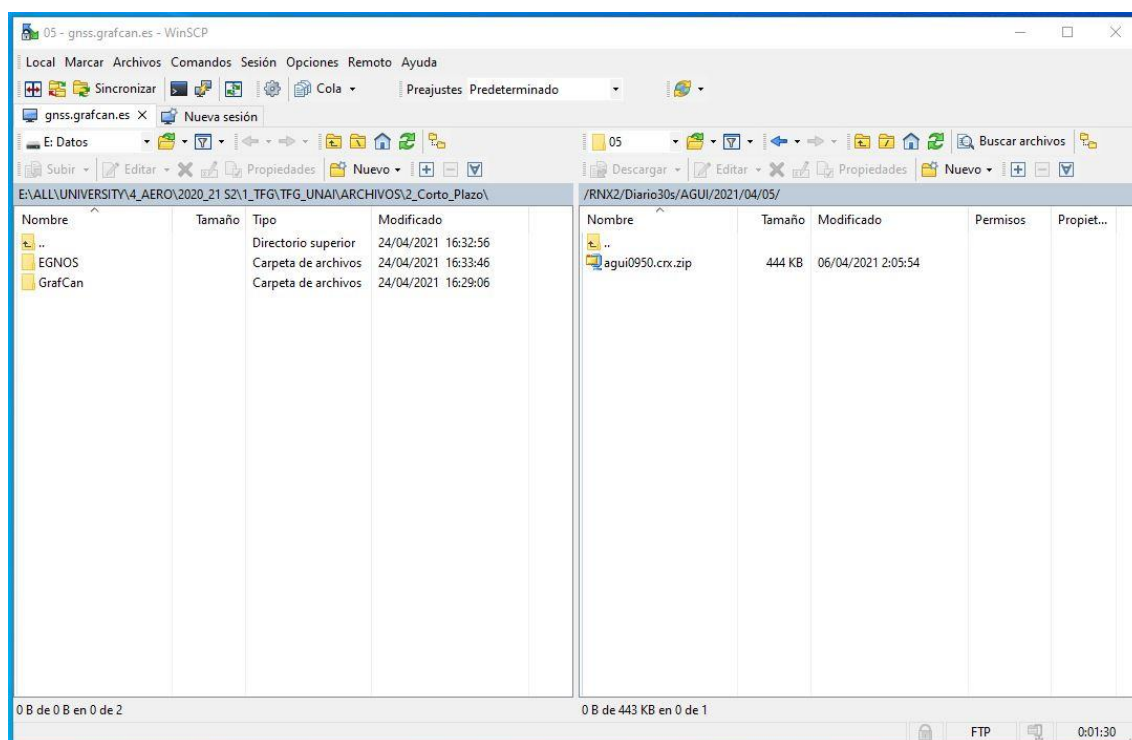


Figura 8.2. Interfaz del FTP de GRAFCAN

Los ficheros obtenidos para un día consisten en una colección de 24 ficheros de navegación “.n”, 24 ficheros de observación “.d”, los cuales se encuentran comprimidos en formato Hatanaka, cuyo proceso de descompresión se detallará a continuación, además de 24 ficheros “.g”, que se suprimen, ya que no son de interés para el trabajo a realizar. Ya que estos datos son útiles para la parte de validación a corto plazo, solo se requiere de ficheros en relación a 2 días, por lo que el número de archivos se duplica y se cuenta finalmente con una colección de 96 archivos a usar más adelante.

Con el fin de detallar paso a paso la obtención de archivos se comienza en este punto con un resumen a modo de lista de los archivos obtenidos hasta el momento.

- 48 archivos de observación “.d” comprimidos en formato Hatanaka.
- 48 archivos de navegación “.n” descomprimidos.

8.1.2 Servicio FTP de EDAS (EGNOS)

De la misma manera que se detallado en ocasiones anteriores, el uso de un sistema GNSS como sistema de navegación requiere el complemento de un sistema de aumentación. En el caso de este trabajo, el sistema de aumentación a utilizar se basa en satélites y se denomina EGNOS, el sistema SBAS del entorno europeo. El uso de un sistema de aumentación hace que se cumplan los requisitos relativos a la precisión, integridad, disponibilidad y continuidad de los que se ha de demostrar el cumplimiento para operar libremente. Del mismo modo, los datos obtenidos a partir del sistema

EGNOS servirán como complemento para los datos que ya han sido obtenidos por receptores GNSS.

En capítulos anteriores se hablaba de la estructura de EGNOS y se comentaba la existencia del servicio EDAS por parte de EGNOS. El servicio EDAS (*EGNOS Access Data Service*) proporciona acceso a los usuarios a los diferentes tipos de datos creados por parte de las estaciones RIMS y NLES del sistema EGNOS. Para acceder a estos datos se utiliza un servidor FTP, al igual que se procedía en el caso de los datos relativos a las estaciones GNSS.

La plataforma de EDAS dispone de un gran nivel de seguridad para evitar cualquier percance que pueda suceder. Es por ello que se requiere de varios pasos y un periodo de tiempo para conseguir acceso a esta plataforma [29].

En primer lugar, el usuario se ha de registrar en la página web *EGNOS User Support Website*, en la cual se encuentran los servicios de EGNOS que se basan en Internet. El registro es sencillo e instantáneo, obteniendo acceso a tu cuenta en los minutos posteriores a su creación. En segundo lugar, una vez habiendo accedido como usuario de la página web, se ha de solicitar acceso al servicio EDAS a través de un formulario en el cual se han de facilitar los datos personales, dirección IP y objetivo de la petición de servicio, además del entorno de EDAS del que se solicita acceso, que en este caso es FTP. La confirmación de este segundo registro no es instantánea y han de transcurrir más de 24 horas para recibir confirmación.

Una vez obtenidas las credenciales con las que acceder al servidor FTP, se pasa a la búsqueda de la carpeta que contenga los datos requeridos, lo cual resulta muy sencillo ya que únicamente se ha de filtrar por fechas, filtrando en primer lugar por el año y, más tarde, por el día del año en orden completo, del 1 al 365. En este caso los días son el 5 y 6 de abril, que son en estos términos son los días 95 y 96. En la figura 8.3 se ven los resultados de la búsqueda y como se estructura el servidor FTP de EDAS.

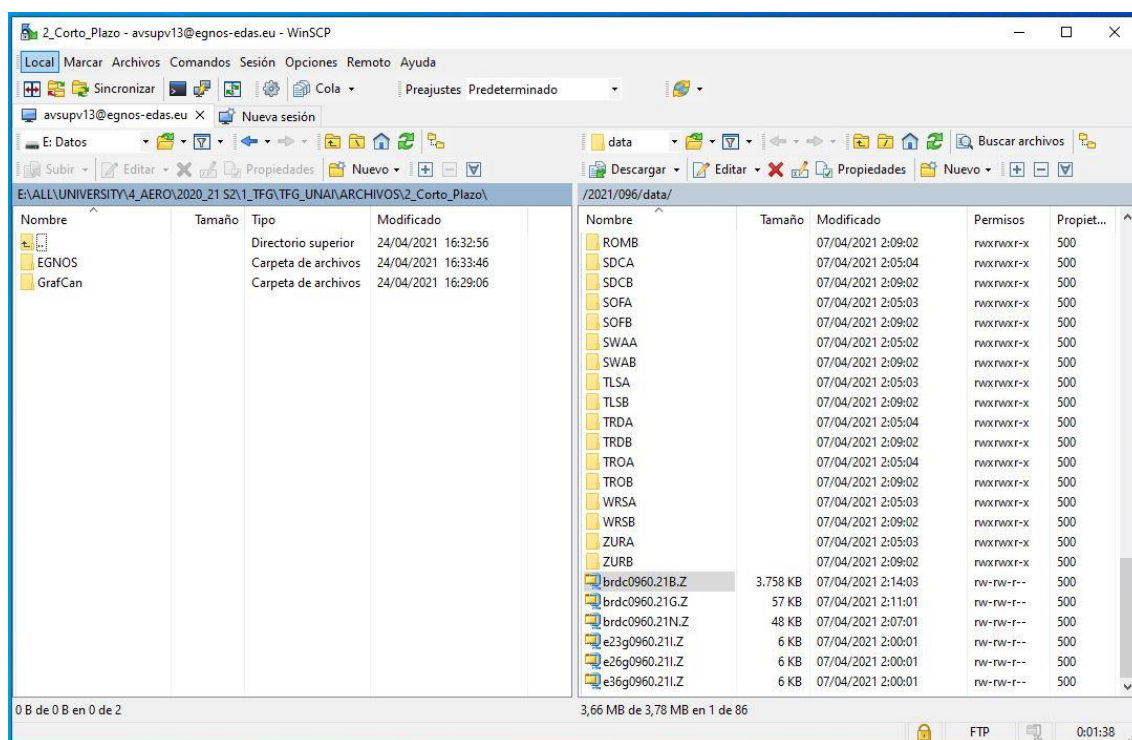


Figura 8.3: Interfaz del FTP de EGNOS EDAS

En este servidor se proporcionan una gran cantidad de datos relacionados con el funcionamiento del sistema EGNOS y todos sus parámetros asociados. Sin embargo, los únicos archivos de interés para este proyecto son los ficheros SBAS, de extensión “.b”. Dentro de este servidor el archivo a descargar es un archivo comprimido que se denomina siguiendo la siguiente nomenclatura:

brdcddd0.yyB.Z

Donde:

- **brcd**: será sustituido más adelante por el código de la estación AGUI.
- **ddd**: día en formato GPS. 095 y 096 en este caso.
- **yy**: dos últimos dígitos del año de registro de datos.

Se llega así al momento en el que todos los ficheros ya han sido obtenidos. Sin embargo, aún quedan pasos relativos a la edición y procesado de estos archivos.

Con el fin de recapitular, se recuerda cual es el estado de los ficheros adquiridos hasta el momento:

- 48 ficheros de observación a falta de descomprimir: AGUI09[5-6][A-X].21d.
- 48 ficheros de navegación: AGUI09[5-6][A-X].21n.
- 2 ficheros SBAS: BRCD09[5-6]0.21b.

8.1.3 WinSCP

Una vez detalladas las diferentes entradas a distintos servidores FTP resulta de vital importancia comprender la forma en la que se interactúa con estos servidores. Para acceder a uno de estos servidores y tener así acceso a todos los datos y servicios que estos ofrecen se requiere de una aplicación diseñada para tal fin.

De entre las aplicaciones conocidas para acceder a los servidores FTP, se ha optado por usar el *software* de acceso libre “WinSCP”, descargable a través de la web del enlace [30] ubicado en la parte final de este trabajo. La descarga de este *software* resulta muy sencilla y rápida.

Una vez descargado el *software*, al abrir la aplicación, la interfaz inicial solicita una serie de dominios a rellenar, entre los que se encuentran el nombre del servidor, el número de puerto, usuario y contraseña, además del tipo de protocolo, que en este caso siempre va a ser FTP, ya que es el usado en estos casos. Una vez conectado a un servidor este se queda registrado y únicamente se ha de escribir la contraseña cada vez que se quiera acceder al sistema. En la siguiente figura se puede observar la interfaz inicial del programa, con los campos a rellenar a la derecha y las entradas registradas a la izquierda.

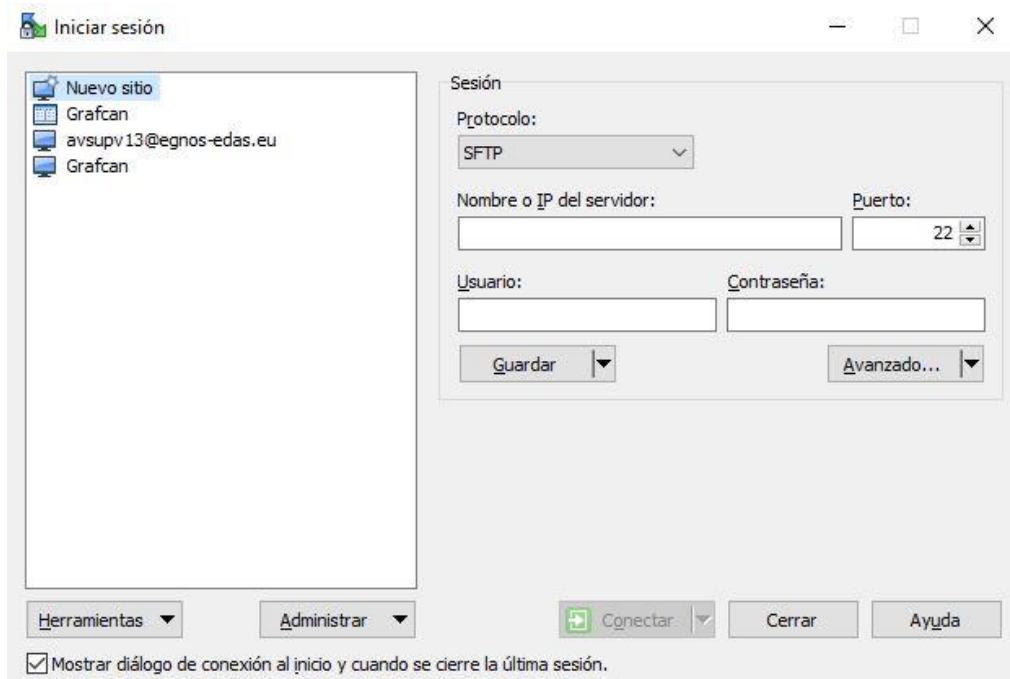


Figura 8.4: Interfaz del programa WinSCP

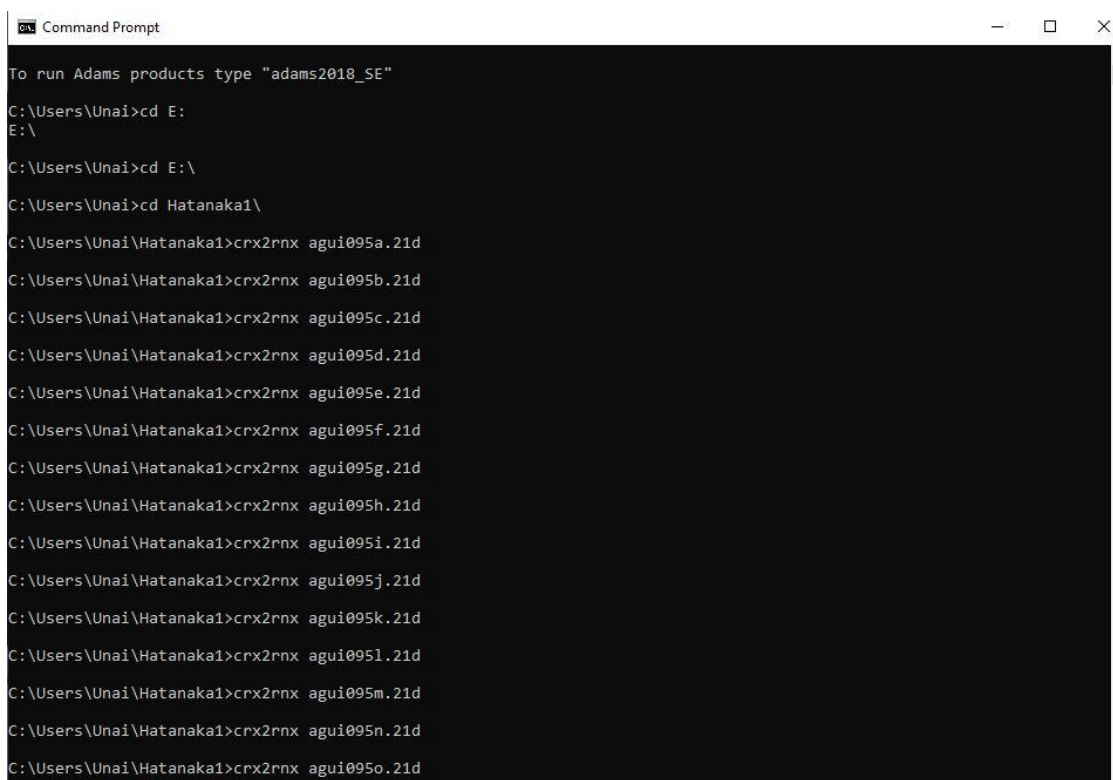
8.2 Hatanaka

La segunda de las aplicaciones utilizados a lo largo de este proceso es el *software* libre Hatanaka, también conocido como RNXCMP. Esta aplicación cumple con

la necesidad de comprimir, descomprimir e incluso restaurar ficheros de observación GNSS. Esta aplicación se puede descargar en el enlace [31]. El *software* descargado funciona de manera correcta con ficheros RINEX, ya sean pertenecientes a la versión 2.xx o la versión 3.xx. Haciendo uso de la aplicación, estos ficheros pueden ser transformados en el formato Hatanaka a través de su compresión o, de manera inversa, obtener archivos RINEX a partir de los archivos comprimidos en formato Hatanaka, como es el caso de este proyecto, en el cual se han de descomprimir los ficheros de observación obtenidos anteriormente del servidor FTP del GRAFCAN.

La aplicación Hatanaka no dispone de interfaz propia, por lo que no se puede abrir de forma directa y se ha de ejecutar desde la consola del ordenador, accesible escribiendo “cmd” en el buscador habitual interno del ordenador. Además, para que el *software* funcione de manera correcta, todos los archivos de observación han de encontrarse en una misma carpeta, junto con todos los ficheros obtenidos durante la descarga de Hatanaka, que consisten básicamente en 3 ejecutables (crx2rnx.exe, rnx2crx.exe y splname.exe) y 4 lotes de archivos conjuntos necesarios para el desarrollo eficaz de la aplicación (CRZ2RNX.BAT, CRZ2RNX1.BAT, RNX2CRZ.BAT y RNX2CRZ1.BAT).

En la siguiente figura se observa el entorno de la consola de Windows 10 con los comandos de la aplicación Hatanaka.



```
Command Prompt
To run Adams products type "adams2018_SE"
C:\Users\Unai>cd E:
E:\
C:\Users\Unai>cd E:\
C:\Users\Unai>cd Hatanaka1\
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095a.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095b.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095c.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095d.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095e.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095f.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095g.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095h.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095i.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095j.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095k.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095l.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095m.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095n.21d
C:\Users\Unai\Hatanaka1>crx2rnx agui095o.21d
```

Figura 8.5: Consola de Windows con los comandos de uso de Hatanaka

El objetivo de este proceso es pasar de los ficheros con terminación “.d” a los ficheros resultantes con terminación “.o”. Para ello, se ha de ejecutar el comando “crz2rn.exe” con cada uno de los 48 ficheros de observación con extensión “.d”. Por otra parte, cabe recordar que, antes de comenzar a ejecutar los comandos, se ha de cambiar el directorio de la consola para que este coincida con la carpeta en la cual se encuentran todos los archivos necesarios.

Como recordatorio, en este punto del proceso se dispone de los siguientes ficheros:

- 48 ficheros de observación descomprimidos: AGUI09[5-6][A-X].21o.
- 48 ficheros de navegación: AGUI09[5-6][A-X].21n.
- 2 ficheros SBAS: BRCD09[5-6]0.21b.

8.3 TEQC

La tercera aplicación que se usa durante este trabajo es la conocida como TEQC. Esta aplicación fue desarrollada por la UNAVCO y se utiliza para resolver ciertos problemas que puedan surgir previos al procesado final de los datos GNSS, con la posibilidad de introducir únicamente archivos RINEX o BINEX. El *software* TEQC puede ser adquirido a través de [32]. Se compone por una gran cantidad de funciones, destacando entre ellas 3: la edición de ficheros RINEX y BINEX, el procesado de ficheros binarios y la verificación cualitativa de los diferentes archivos de GPS, GLONASS, Galileo y de tipo SBAS.

Junto con los diferentes ficheros del programa, la descarga de TEQC incluye un manual en el cual se describen todas las funciones disponibles. De todas ellas, en el desarrollo de este trabajo se utilizan únicamente 2, la concatenación de ficheros y el control de calidad. La primera de ellas, la concatenación de archivos es necesario como paso principal para unir los 24 ficheros por día de observación y navegación que se obtuvieron del servidor FTP del GRAFCAN.

Por lo tanto, los 96 ficheros de navegación y observación se van a reducir a una cantidad de 4 ficheros, uno de observación y otro de navegación por cada uno de los dos días que dura el ensayo de corto plazo. Los archivos SBAS obtenidos del FTP de EDAS no necesitan ser editados, ya que se descargan directamente con el formato que se requerirá en el procesado posterior de PEGASUS.

El funcionamiento del *software* TEQC es relativamente parecido al Hatanaka, ya que en este caso tampoco se dispone de una interfaz propia y se ha de hacer uso de la consola del ordenador. Además, para el uso de esta aplicación también se han de posicionar todos los archivos requeridos en el mismo directorio, y así evitar cualquier tipo de fallo derivado.

De manera análoga al *software* Hatanaka, el primer paso a seguir es redirigir el directorio de la consola de Windows a la carpeta en la que se encuentran todos los

con el fin de evaluar el correcto funcionamiento de las señales y sistemas de navegación relacionados con Galileo y EGNOS. La forma de operar de la aplicación se basa en la recepción de señales satelitales para más tarde, haciendo uso de algoritmos creados específicamente para ello y detallados en los conocidos documentos MOPS, verificar su correcto funcionamiento.

La herramienta PEGASUS consta de varias funciones como son el posicionamiento de usuarios usando simulaciones de receptores, la obtención de predicciones de atributos como son la continuidad y la disponibilidad a partir de datos en tiempo real o la determinación de los parámetros relacionados con la *performance* de los sistemas. Haciendo uso de estas funcionalidades, la aplicación es capaz de realizar validaciones de estándares de la OACI, RTCA y EUROCAE, en las cuales se han de demostrar ciertos requisitos relacionados con la *performance* del sistema [33].

Dado su gran cantidad de funcionalidades, esta aplicación se ha posicionado como base del estudio práctico de este proyecto en cuanto al procesado de datos. La aplicación se estructura de manera modular, ofreciendo así distintos niveles y funcionalidades a cada uno de sus usuarios.

Una vez descargada e instalada esta aplicación, se puede observar que se dispone de una serie de tutoriales extensos en los cuales se explica con gran claridad cada uno de los procesos a realizar haciendo uso de PEGASUS. El documento con información más relevante para este trabajo es el “GBAS Tutorial”, en el cual se exponen todos los casos relacionados tanto con el GBAS como con el SBAS, divididos en 8 escenarios basados en simulaciones con los cuales, a modo de ejemplo, se puede comprender el funcionamiento del programa de manera clara. Previamente al estudio de este trabajo, se han realizado los ejemplos con el fin de obtener cierta soltura con el uso de este *software*, observando que en determinadas ocasiones la aplicación no funcionaba de manera óptima debido a errores en los datos y desactualizaciones en los propios datos, con respecto a la última versión de la aplicación.

La versión utilizada durante el desarrollo de este trabajo es la versión 19.07.03, que presenta varias mejoras de funcionamiento en comparación con su versión anterior y la corrección de algunos fallos de procesamiento. El *software* PEGASUS, a diferencia de Hatanaka y TEQC, cuenta con su propia interfaz, como se puede observar en la figura 8.7.

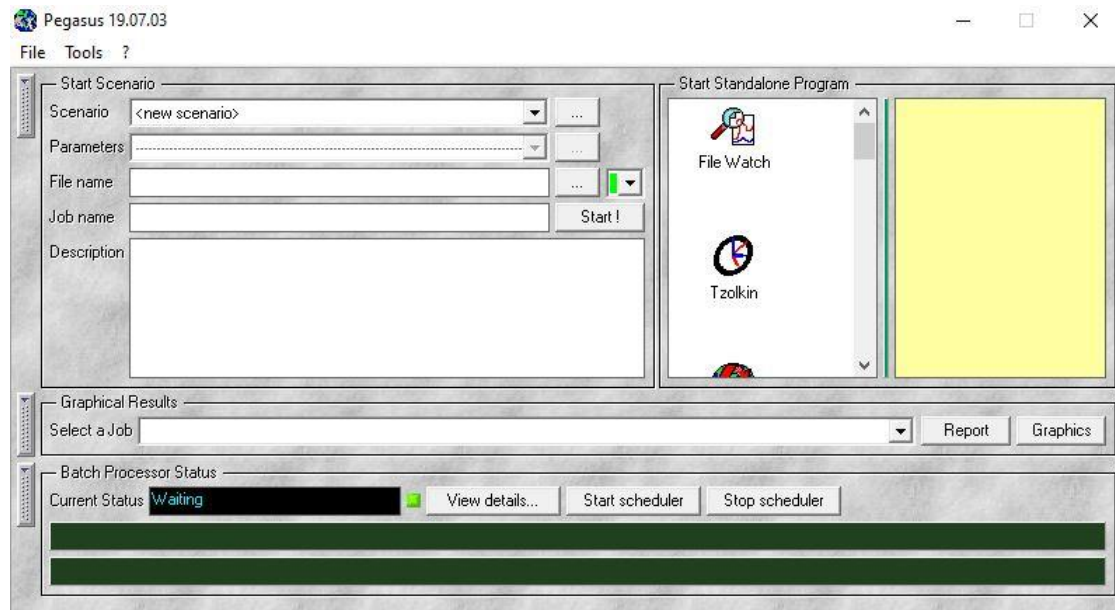


Figura 8.7: Interfaz de PEGASUS

Haciendo uso de la interfaz principal, la aplicación permite acceder a cada uno de los módulos contenidos en ella. Sin embargo, para activar cada uno de estos módulos se ha accedido a través de la propia carpeta de instalación de PEGASUS, de esta forma se pueden evitar errores propios del funcionamiento de la aplicación.

La carpeta mencionada se obtiene en el momento de descarga del *software* y contiene todos los ficheros necesarios para el inicio de la aplicación. Cabe destacar que para poder visualizar correctamente el contenido de PEGASUS se han de instalar un compilador de Matlab y un acceso a las librerías visuales del entorno de Microsoft. Todo esto viene recogido en el archivo “readme.txt”, que es otro de los ficheros obtenidos con la descarga. En la figura 8.8 se pueden ver todos los archivos obtenidos.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
InstallationData	28/06/2019 14:05	Carpeta de archivos	
MCR_R2013b_win32_installer	17/01/2014 17:01	Aplicación	457.716 KB
readme	04/07/2019 18:47	Documento de te...	21 KB
setup	07/05/2019 8:29	Aplicación	182 KB
vcredist_x86_vstudio2008sp1	08/09/2015 11:42	Aplicación	4.119 KB

Figura 8.8: Archivos obtenidos tras la instalación de PEGASUS

La carpeta “InstallationData” resulta de vital importancia para el desarrollo de este proyecto, ya que dentro de ella se hallan los módulos a usar a continuación. Dentro de dicha carpeta se encuentran 4 subcarpetas con escenarios, manuales, datos de simulaciones y, finalmente, la carpeta “software”, en la cual se dispone de los enlaces

de ejecución de cada uno de los módulos. Los módulos son los siguientes por orden de uso: “convertor.exe”, “gnss_solution.exe”, xpl_estimation.exe” y “MFileRunner.exe”. Por último, es importante mencionar que cada uno de los módulos ha sido ejecutado haciendo uso del modo de compatibilidad de Windows XP, con el fin de evitar errores funcionales. Esto se puede apreciar de manera gráfica en la figura 8.9, donde se ve la carpeta “software” y el cambio de propiedades del ejecutable de la aplicación “convertor.exe”.

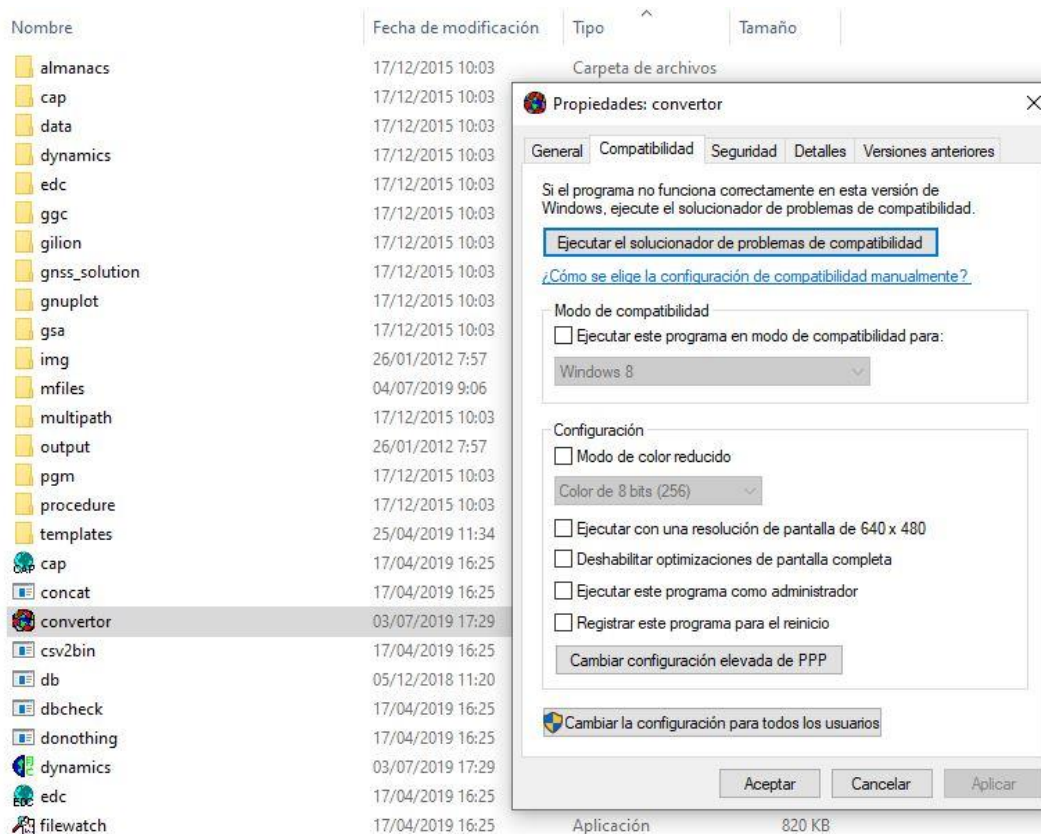


Figura 8.9: Ventana de cambio de propiedades en PEGASUS

8.4.1 Módulo *Convertor*

El módulo *Convertor* constituye la primera fase de las cuatro que componen el trabajo con PEGASUS. Este módulo se encarga de procesar los datos introducidos como archivos con extensión RINEX y transformarlos a ficheros con formato ASCII, de manera que los 3 módulos posteriores puedan leer estos archivos de manera correcta. Dentro de este módulo solo se han de ejecutar los ficheros de observación, es decir, los 2 que tienen extensión “.o”. Los de navegación y de SBAS ya se encuentran con el formato correcto.

A la hora de proceder con el primer módulo, es fundamental recordar que los 6 archivos obtenidos (de observación, de navegación y de SBAS) han de estar dentro de la carpeta de “software”, en la que se encuentran de la misma manera los ejecutables de los diferentes módulos. Por otra parte, antes de ejecutar el

módulo, se han de renombrar los ficheros de datos SBAS para que coincidan en nombre con los demás ficheros, pasando de llamarse BRCD09[5-6]0.21b a llamarse AGUI09[5-6]0.21b. Esto es de vital importancia, ya que los 3 tipos de archivos se han denominar de la misma manera para que el programa sea capaz de crear la asociación pertinente.

En la figura 8.10 se puede apreciar la interfaz característica del módulo *Convertor* una vez rellenados los campos y preparado para ser ejecutado.

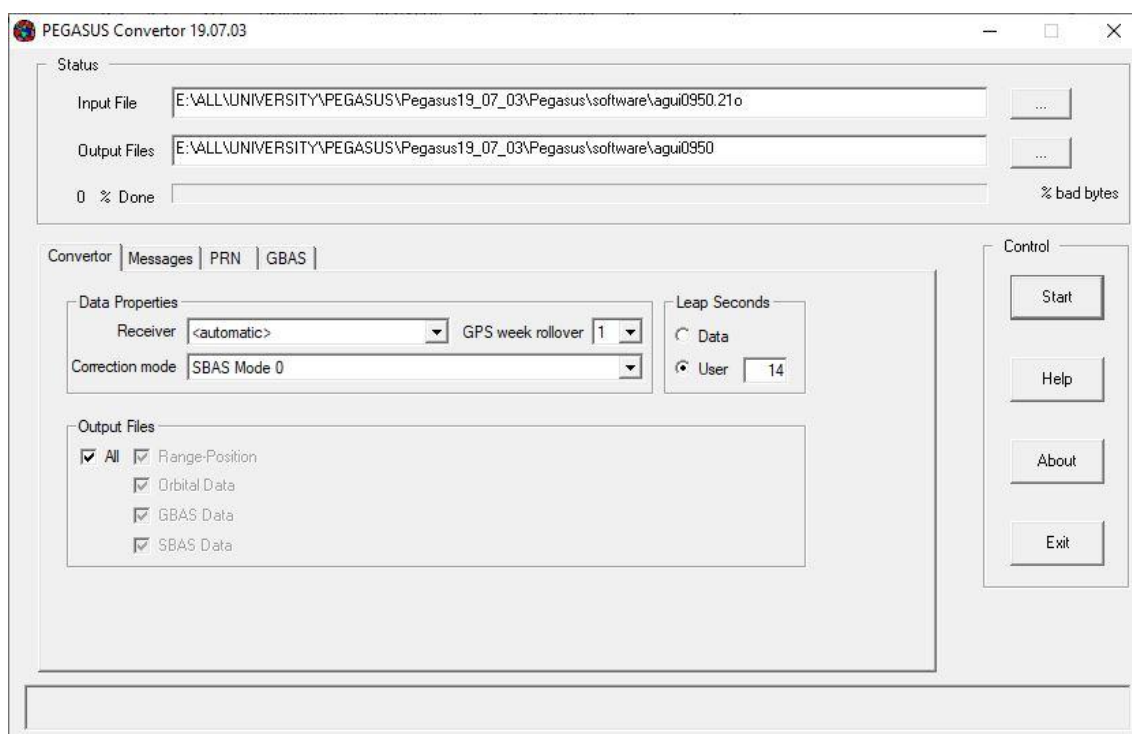


Figura 8.10: Módulo Convertor preparado para ser ejecutado

Esta interfaz ofrece una gran cantidad de opciones, con campos desplegable para elegir el modo de análisis que se pretende realizar. Las opciones que se han tomado responden a las necesidades del caso y son las siguientes: en primer lugar, el tipo de receptor elegido ha sido el *Automatic*, ya que el módulo es capaz de descifrar por sí mismo cual es el tipo de receptor utilizado; en segundo lugar, como modo de corrección ha sido elegido el SBAS MODE 0, ya que haciendo uso del mismo, los mensajes de tipo 0 no se interpretan como correcciones rápidas, lo que supondría un error en el análisis; por otra parte, el *GPS Week Rollover* no ha sido modificado, manteniendo su valor por defecto de 1 para únicamente verse afectado por la fecha de recogida de los datos; y, por último, el campo *Leap Seconds* se ha mantenido con el valor 14, como sugiere el manual a seguir para evitar posibles fallos.

Una vez ejecutado el módulo, en la pestaña de *Messages* de la interfaz se pueden visualizar datos como el número de señales recibidas, como se puede observar en la figura 8.11.

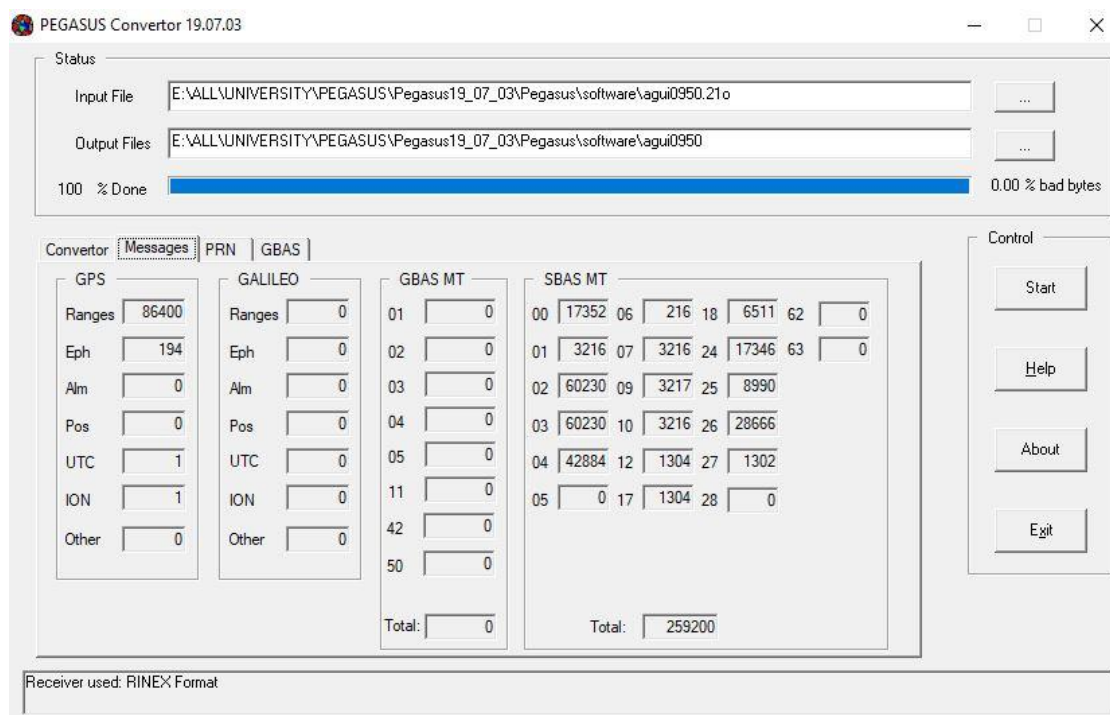


Figura 8.11: Módulo Convertor tras su ejecución

Tras la ejecución del módulo *Convertor* se generan dentro de carpeta “software” una serie de ficheros por cada uno de los 2 días de evaluación a corto plazo. Los ficheros son los siguientes:

- Varios ficheros AGUI09[5-6]0 de extensión “.s”, “.sfc” y “.ssc”, relativos al tipo de mensajes.
- Varios ficheros de efemérides GPS AGUI09[5-6]0_BRCD09[5-6]0.21n.
- Varios ficheros de efemérides SBAS AGUI09[5-6]0_BRCD09[5-6]0.21h.
- Un fichero “.smt” con información de los mensajes SBAS.
- Un fichero AGUI09[5-6]0_GEO2063.alm relativo al almanaque SBAS.
- Un fichero AGUI09[5-6]0_cnv.log usado en la conversión.
- Un fichero AGUI09[5-6]0_crv.rng con datos relativos a la posición.
- Un fichero AGUI09[5-6]0.mif con el valor de varios parámetros relativos al procesado de los datos.

8.4.2 Módulo *GNSS_Solution*

El segundo de los módulos empleados de PEGASUS es el “GNSS_Solution”. Este módulo se emplea como herramienta de postproceso y se encarga de calcular la posición a partir de los ficheros introducidos, de acuerdo con los estándares MOPS para las señales GNSS de estudio en este trabajo, que son GPS, SBAS y GBAS. La solución obtenida es numérica, pero haciendo uso del siguiente módulo de PEGASUS, estos datos pueden exponerse de manera gráfica para facilitar su análisis. El funcionamiento

de este módulo se basa en que, a partir de los ficheros obtenidos hasta el momento, los analiza para ofrecer los parámetros que expresan las características puntuales de los sistemas, como son los 4 parámetros principales de *performance* (precisión, integridad, disponibilidad y continuidad), las distancias, los errores relativos al sistema y los niveles de protección, útiles para entender la integridad del proceso.

De la misma forma que el módulo anterior, este se ha de abrir directamente desde la carpeta “software”. Una vez abierto este nuevo módulo, se muestra su propia interfaz donde se han de seleccionar los parámetros del análisis y utilizar como entrada los archivos AGUI09[5-6]0_crv.rng, obtenido del módulo *Convertor*, como se puede apreciar en la figura 8.12.

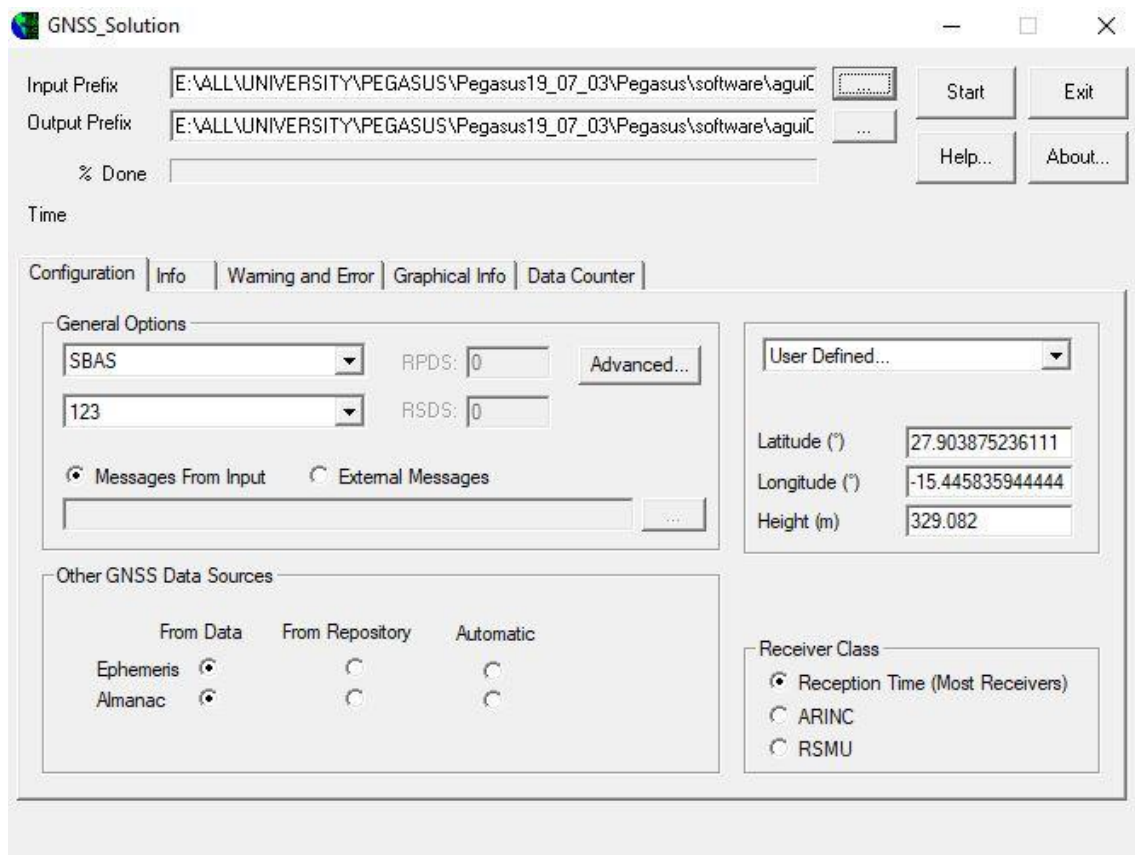


Figura 8.12: Módulo GNSS_Solution preparado para ser ejecutado

La primera de las características a elegir es el tipo de datos que se han de analizar, eligiendo SBAS de entre todas las opciones, entre las que están GBAS, DGPS, GPS *Standalone* y Galileo *Standalone* entre otras. Como tipo de solución se ha seleccionado la opción 123, que hace referencia al PRN 123 de EGNOS, pudiendo elegir de la misma manera el PRN 136 sin un cambio significativo en la solución. Por otra parte, existen 2 campos, el RPDS (*Runway Path Data Selector*) y el RSDS (*Reference Station Data Selector*), que no pueden ser modificados, ya que son parámetros propios del entorno GBAS.

En el campo de la derecha de la interfaz se han de introducir las coordenadas utilizadas como referencia, que son las coordenadas de la estación en la cual se sitúa el receptor. Existen una serie de registros de coordenadas, pero en este caso, se ha usado la opción "*User defined*" para poder escribir directamente las coordenadas de la estación de AGÜIMES empleada en este proyecto. Estas coordenadas se obtienen directamente de la Reseña de Estación Permanente obtenibles en la página web del GRAFCAN. Las coordenadas han de ser pasadas al formato de grados para que el módulo funcione de manera correcta. Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 27°54'13.95085"
- Longitud: 15°26'45.00940"
- Altitud elipsoidal: 329.082 metros

En los campos referentes al almanaque y a las efemérides se escoge la opción de "*From Data*", por la cual se establece que ambos datos sean buscados automáticamente en la carpeta "software" con el mismo nombre que los demás archivos y con sus respectivas extensiones. No obstante, en la interfaz se ha de señalar la opción "*Ignore Almanac*" dentro de la pestaña de opciones avanzadas. Esto se debe a que los datos RINEX que se usan no disponen del almanaque requerido por el hecho de ser datos SBAS. Cabe destacar que el almanaque es prescindible en esta ocasión, pero más adelante será de gran importancia en el último módulo de PEGASUS. Por otra parte, el resto de parámetros escogidos en la interfaz de este módulo se han dejado con su valor por defecto.

Después de haber introducido todas las características necesarias, se inicia el funcionamiento del módulo, pasando a realizar el análisis. Al pasar a la pestaña *Graphical Info* se puede visualizar el comportamiento en el tiempo de diferentes parámetros, como son los niveles de protección vertical (VPL) y horizontal (HPL), y los errores de posición (VPE y HPE). Además, existen 5 casillas referentes a los tipos de aproximaciones soportadas por el módulo que varían su color entre rojo y verde en función de si los datos analizados cumplen con los requisitos para desarrollar una de esas aproximaciones. En la figura 8.13 se puede observar la pantalla donde se muestra la evolución del análisis.

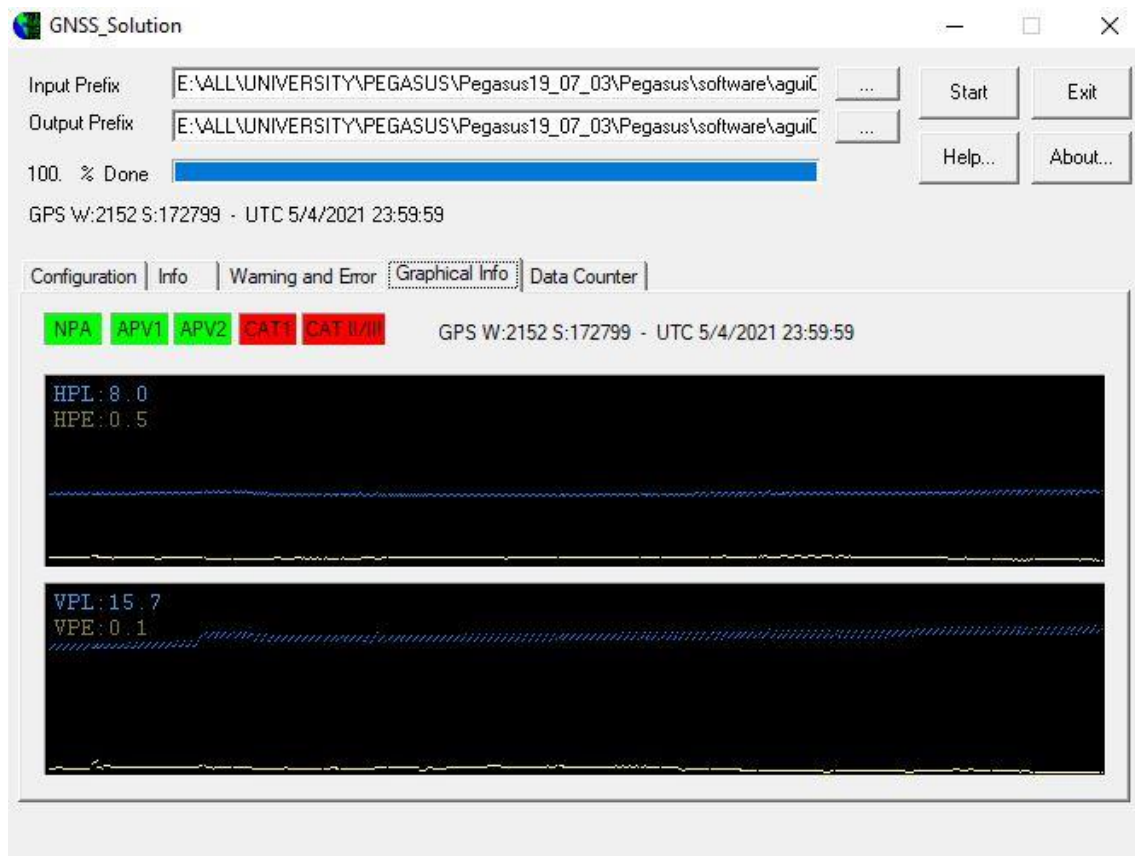


Figura 8.13: Módulo GNSS_Solution tras su ejecución

Al cabo de unos minutos, el análisis concluye y se generan en la carpeta “software” los siguientes ficheros, que actúan como solución del módulo:

- AGUI09[5-6]0_sol.pos: archivo con los resultados de posicionamiento.
- AGUI09[5-6]0_sol.mif: archivo en el cual se encuentran los resultados de procesado.
- AGUI09[5-6]0_sol.log: archivo con el *output* del programa en formato de texto.

8.4.3 Módulo XPL_Estimation

Tras ejecutar el segundo módulo de PEGASUS, se llega al tercero de estos, el módulo *XPL_Estimation*. Este módulo se define con el fin de obtener una solución en forma numérica de los parámetros relativos a la *performance* del sistema SBAS y sus requisitos para aviación civil. A diferencia del módulo anterior, este hace uso de datos reales de las señales sin requerir de medidas obtenidas por parte de un receptor.

Resulta de gran importancia comentar que este módulo no debería ser usado en un principio, ya que el cuarto y último módulo habría de ofrecer toda la información que vamos a recopilar usando la *XPL_Estimation*. Por tanto, los datos que se pretende

obtener de este módulo son los relativos a la disponibilidad y la continuidad, en los cuales aparecen fallos en el módulo *M-File Runner*.

Este módulo, de la misma manera que los anteriores dispone de su propia interfaz, la cual se puede observar en la figura 8.14.

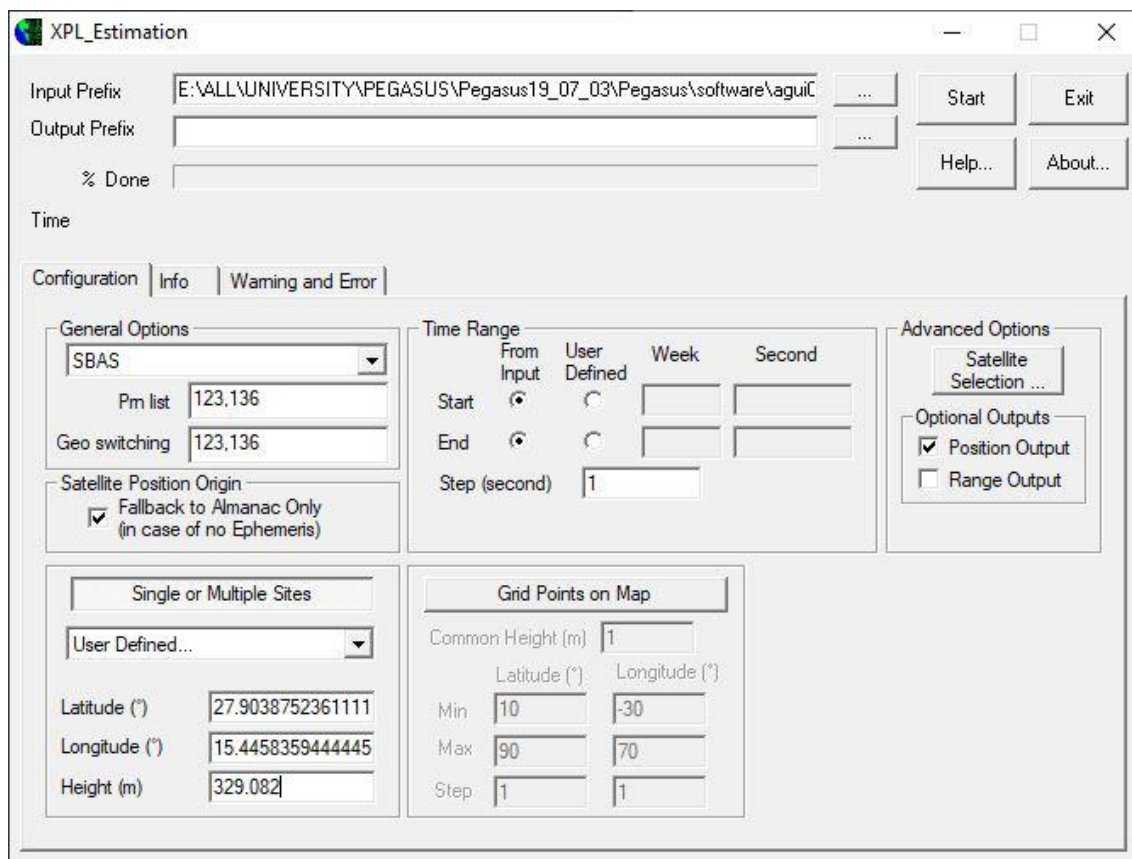


Figura 8.14: Módulo XPL_Estimation preparado para su ejecución

A la hora de rellenar los campos de la interfaz, el primer paso es introducir como entrada uno de los archivos obtenidos al finalizar el módulo *Convertor*, el archivo con extensión “.smt”. Como salida de este tercer módulo se obtendrá un archivo con el mismo nombre que la entrada ofrecida. Además, en la parte derecha de la pantalla, se le puede pedir al sistema que proporcione como salida adicional del programa ficheros de posición y rango. En este caso, se solicita la ejecución del fichero de posición a pesar de que el fichero predeterminado resulta suficiente para obtener los resultados que se necesitan.

Las características elegibles del módulo se dividen en varias partes. En primer lugar, dentro de las opciones generales se ha de seleccionar el sistema que se analiza, que es SBAS, junto con los satélites que se han de emplear para el procesado de los mensajes, que son los 2 satélites operaciones de EGNOS, el 123 y el 136, haciendo así que se produzcan dos soluciones, una para cada uno de los satélites. Por otra parte, resulta de gran importancia la selección del campo “*Fallback to Almanac Only (in case*

of no Ephemeris)”, de tal modo que si no por cualquier motivo los datos de efemérides no se encuentran disponibles para alguno de los satélites se recurra a los datos ofrecidos por el almanaque. El tercero de los cuadros hace referencia a la selección de coordenadas, en el cual se elige la misma opción que en el módulo anterior, haciendo así que se puedan escribir unas coordenadas propias, que son las encontradas en la Reseña de Estación Permanente de Agüimes. Finalmente, en las opciones referentes al *Time Range* se seleccionan los campos “*From input*”, para que así el proceso comience automáticamente en la primera de las épocas de recolección de los datos y finalice en la última. Además, el intervalo de tiempo se deja como 1 segundo, que viene seleccionado por defecto.

Con toda la configuración en orden, se pone en marcha el módulo, el cual tarda varios minutos en procesarse y ofrece una serie de ficheros en forma de solución. Estos ficheros se componen por un archivo de nombre AGUI09[5-6]0_PRN_xpl.stat, donde PRN es cada uno de los satélites de EGNOS, 123 o 136, junto con un tercer fichero que emplea la opción de *GEO Switching*, consistente en el intercambio de satélite haciendo siempre uso del que ofrece mejor cobertura a medida que avanza el tiempo, de nombre AGUI09[5-6]0_switching_xpl.stat. Asimismo, se obtiene un cuarto fichero denominado AGUI09[5-6]0_xpl.mif y varios archivos de extensión “_xpl.pos” que hacen referencia a la solución adicional de posición.

Los archivos de mayor relevancia son los de extensión “_xpl.stat”, ejecutables por varios programas, entre ellos Microsoft Excel. Dentro de estos archivos se halla información que hace referencia a la disponibilidad, niveles de protección y número de épocas válidas para cada una de las 4 aproximaciones soportadas: APV-I, LPV-200, APV-II y CAT-I.

Una vez explicado el funcionamiento del módulo, cabe mencionar que el procesado de los datos por parte de este módulo no habría sido posible sin la descarga previa de los almanaques de cada uno de los 2 días analizados. Se trata de almanaques GPS descargados en Internet a través del enlace [34]. La necesidad de esta descarga se debe a la falta de los almanaques propios de los archivos RINEX obtenidos al principio del proceso. Los ficheros de almanaque ofrecieron información de gran importancia, como se puede observar en la figura 8.15, donde se observan los datos del archivo usando el Bloc de Notas.

```

agui0950_GPS2063.ALM: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
***** Week 104 almanac for PRN-01 *****
ID:                01
Health:            000
Eccentricity:      0.1066350937E-001
Time of Applicability(s): 319488.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9839551985
Rate of Right Ascen(r/s): -0.7863184676E-008
SQRT(A) (m 1/2):   5153.638184
Right Ascen at Week(rad): -0.2561425091E+001
Argument of Perigee(rad): 0.827381899
Mean Anom(rad):    -0.1377392284E+001
Af0(s):            0.7219314575E-003
Af1(s/s):          -0.1091393642E-010
week:              104

```

Figura 8.15: Primera parte del almanaque GPS del día 095

8.4.4 Módulo *M-File Runner*

El último de los módulos de PEGASUS utilizado es el *M-File Runner*. Este módulo ofrece una evaluación estandarizada de manera automática de los diferentes parámetros relacionados con la *performance* de sistemas tanto GPS como SBAS como GBAS.

Del mismo modo que el resto de módulos detallados previamente, este no es una excepción y dispone también de su propia interfaz, en la cual se han de introducir las diferentes características deseadas en el proceso.

El primer paso es determinar las entradas al sistema, que son dos en esta ocasión, el archivo AGUI09[5-6]0_xpl.mif, obtenido del módulo *XPL_Estimation*, y el archivo AGUI09[5-6]0_sol.mif, obtenido en el módulo *GNSS_Solution*.

Por otra parte, el módulo se compone de diferentes funcionalidades, de las cuales se han utilizado únicamente 4. Estas son: el ejecutable "*XPL_Visualization*", encargado de ofrecer diferentes gráficas y métodos visuales a partir de los resultados del módulo anterior; y los ejecutables "*Analyze Position*", "*SBAS Accuracy*" y "*SBAS Integrity*", con los cuales se pretende dar una solución gráfica a los resultados obtenidos en el módulo *GNSS_Solution*. Además, se pretendía utilizar los módulos "*SBAS Availability*" y "*SBAS Continuity*", pero, como se ha comentado previamente, la herramienta transmitía datos erróneos o vacíos, de manera que se ha optado por no hacer uso de ellos. Por último, en la interfaz, se selecciona la opción de *Reports* para poder así obtener la solución en archivos de fácil visualización además de en la propia interfaz.

La figura siguiente muestra la interfaz del módulo *M-File Runner* configurado para realizar las 3 funciones relacionadas con la posición.

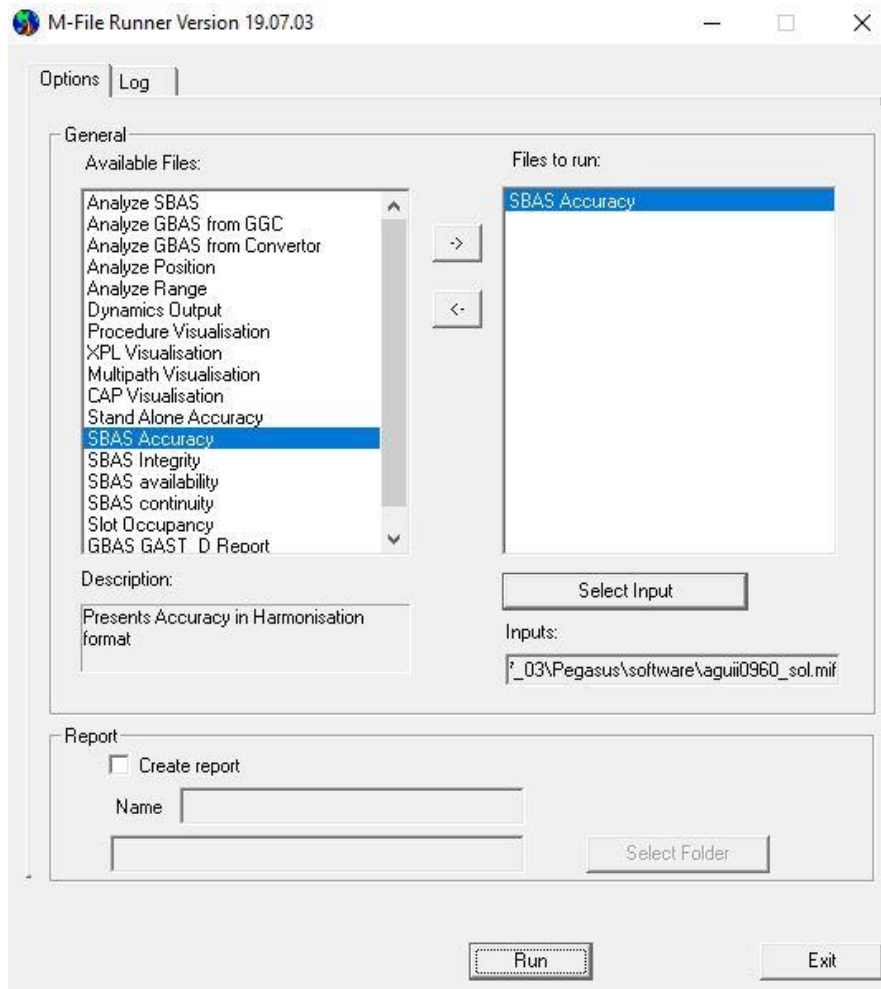


Figura 8.16: Módulo M-File Runner

Finalmente, una vez realizado el procesado de los datos y ofrecida una solución, los resultados obtenidos se pueden dividir en una serie de funciones de gran utilidad para el proyecto:

- Análisis de correcciones rápidas SBAS: ofrece estadísticas de los datos referentes a las correcciones rápidas y gráficas temporales del PRC y el UDREi.
- Análisis de correcciones lentas SBAS: actúa de la misma forma que las correcciones rápidas, pero con los datos de las correcciones lentas.
- Análisis de las correcciones ionosféricas: ofrece estadísticas de cada una de las bandas de emisión con estadísticas del GIVEi y los retrasos.
- Análisis de la distribución del mensaje SBAS: a partir de gráficos y tablas, analiza la cantidad y forma de los mensajes emitidos.

- Diagramas de Stanford: de manera estandarizada ofrece una descripción gráfica de los límites verticales y horizontales, facilitando el entendimiento de la integridad y disponibilidad.
- Gráficos interactivos: ofrece gráficos temporales mostrando la solución ofrecida en el segundo módulo, el *GNSS_Solution*.
- Error Norte-Este: se detalla con respecto a una base el error de posición horizontal.
- Series estadísticas: se crean gráficas en forma de histograma para varios de los parámetros comentados previamente.
- Series temporales del error de posición y los niveles de protección: se crean series de carácter temporal para evaluar el error de posición y el nivel de protección.

Capítulo 9

Resultados obtenidos en la validación

A lo largo del capítulo 9 se detalla el proceso de obtención y visualización de los resultados obtenidos tras haber realizado la validación de procedimientos SBAS. Como se ha comentado previamente, el proceso de validación consta de 3 partes, sin embargo, la tercera fase no se realiza en esta ocasión, debido a la no superación de la fase de toma de datos a corto plazo, como se observará a continuación.

Este capítulo se centrará en los resultados obtenidos de la validación, ya que los requerimientos y métodos que se usan en la validación ya han sido detallados en los capítulos anteriores.

9.1 Toma de datos a largo plazo

Como ya se ha comentado, este estudio inicial se realiza a partir de los 6 últimos informes publicados por la ESSP, de acceso gratuito a través de su web [35] [36] [37] [38] [39] [40]. Para este trabajo, se ha comenzado por el mes de septiembre de 2020, concluyendo en el mes de febrero del año 2021, incluyéndose ambos en el estudio.

Cabe destacar que, para la elaboración de estos informes, solo se utilizan algunas estaciones RIMS, dando lugar a ubicaciones bastante alejadas de alguna de estas estaciones, en las cuales se ha de aproximar el resultado. Sin embargo, en el caso de la isla de Gran Canaria, uno de los RIMS del sistema se sitúa en ese punto, proporcionado así una calidad excepcional al informe en cuanto a los resultados relacionados con esta isla. Se puede observar en la figura 9.1 las estaciones de las que se ofrecen datos, siendo CNR la estación situada en la isla de Gran Canaria.



Figura 9.1: Estaciones RIMS usadas en el informe [35]

A continuación, se detallan los resultados de cada uno de los 4 parámetros que indican la *performance*:

9.1.1 Resultados de precisión

En primer lugar, se han de recordar de forma detallada los valores requeridos por la OACI para una aproximación LPV-200 para el entorno de la precisión. Recordando que la precisión se indica con el percentil 95 de cada uno de los errores de navegación, se da que los valores máximos son 16 metros en cuanto al error horizontal, y de 4 a 6 metros para el vertical.

Expuestos los valores máximos, se observa en la tabla 9.1 que ninguno de los valores recogidos de los informes supera estos valores, por lo que la precisión se considera suficiente. Cabe destacar que dentro del informe estos valores aparecen expuestos directamente en una tabla, por lo que no cabe lugar al error.

<i>Precisión LPV-200</i>	Septiembre (2020)	Octubre (2020)	Noviembre (2020)	Diciembre (2020)	Enero (2021)	Febrero (2021)
VNSE (m)	1.7	1.6	1.8	1.6	1.4	1.4
HNSE (m)	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2	1.2

Tabla 9.1: Resultados de la precisión del estudio de largo plazo

9.1.2 Resultados de integridad

El segundo de los parámetros es el de integridad, que se mide utilizando un indicador que no ha de superar el valor de la unidad para garantizar una integridad suficiente. Este estudio se ha de realizar tanto para el plano horizontal como para el vertical. A continuación, se observa que ninguno de los valores supera el valor de 1, por lo que la integridad es lo suficientemente buena.

<i>Índices de seguridad</i>	Septiembre (2020)	Octubre (2020)	Noviembre (2020)	Diciembre (2020)	Enero (2021)	Febrero (2021)
Horizontal	0.26	0.28	0.25	0.27	0.27	0.27
Vertical	0.27	0.29	0.3	0.29	0.31	0.3

Tabla 9.2: Resultados de la integridad del estudio de largo plazo

Para mostrar los resultados de integridad se emplea una gráfica para cada uno de los planos, horizontal y vertical, como se aprecia en las figuras 9.2 y 9.3, obtenidas del informe del mes de septiembre de 2020.

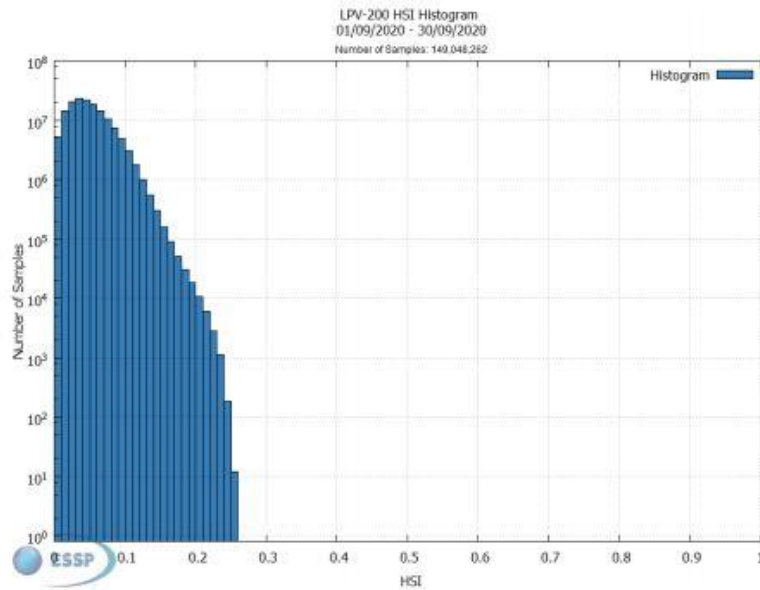


Figura 9.2: Histograma mostrando el HSI para el mes de septiembre [35]

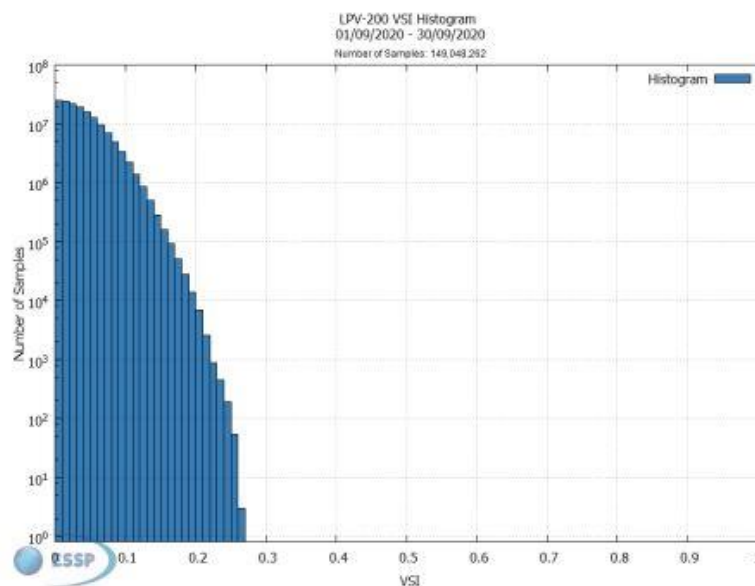


Figura 9.3: Histograma mostrando el VSI para el mes de septiembre [35]

9.1.3 Resultados de disponibilidad

El tercero de los parámetros es la disponibilidad, cuyo índice viene dado por el porcentaje de épocas en las cuales los límites de alerta no son superados por los niveles de protección. Estos límites de alerta, para una aproximación LPV-200 son de 40 metros en el plano horizontal y 35 en el vertical. Además, la OACI establece que este índice ha de superar el 99%. Los resultados de disponibilidad, a diferencia de los de precisión e integridad, emplean un mapa coloreado en función de sus valores, como se puede ver en la figura 9.4 para el mes de septiembre de 2020.

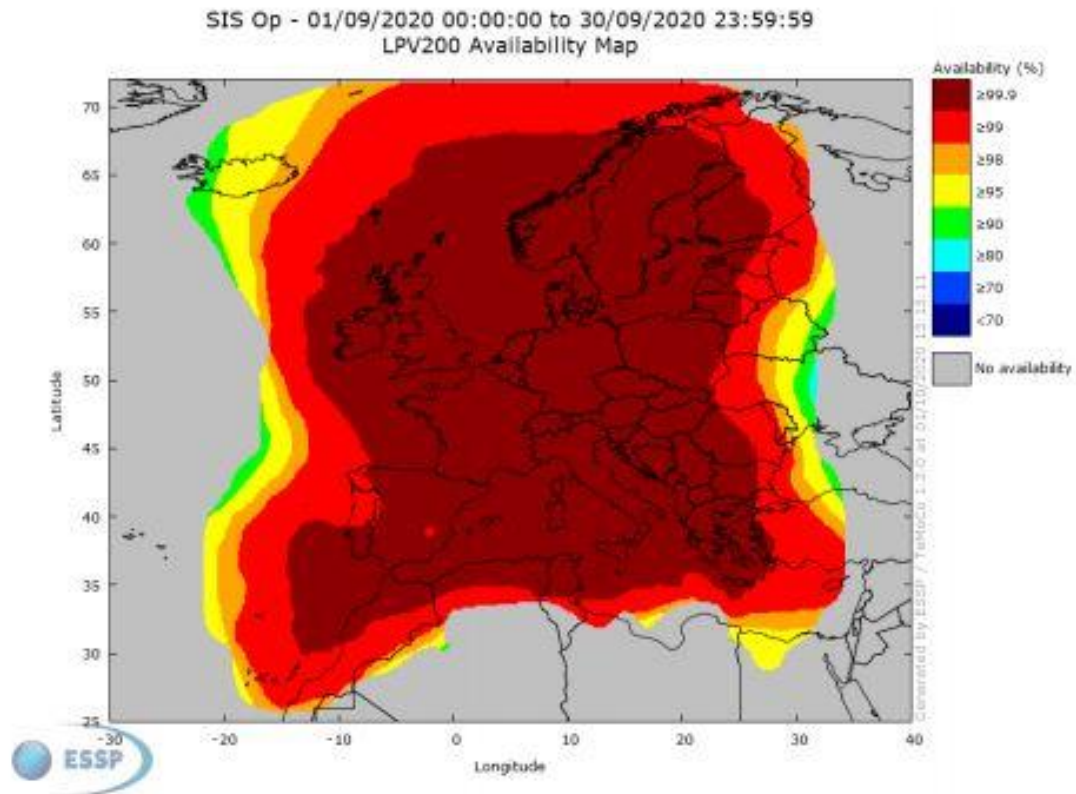


Figura 9.4: Mapa mostrando la disponibilidad del sistema en la región de Europa para el mes de septiembre [35]

Lamentablemente, los valores de disponibilidad no son suficientes, como se muestra en la tabla 9.3. Esto resulta determinante para la validación ya que no permite la aprobación de este proceso y su posterior implantación, con unas consecuencias notables que se expondrán más adelante.

Disponibilidad LPV-200 (%)	Septiembre (2020)	Octubre (2020)	Noviembre (2020)	Diciembre (2020)	Enero (2021)	Febrero (2021)
LPV-200	≥ 99	≥ 99	≈ 98	≥ 99	≥ 99	≈ 98
HPL < 40 m						
VPL < 35 m						

Tabla 9.3: Resultados de la disponibilidad del estudio de largo plazo

Por otra parte, existe una segunda forma de estudiar la disponibilidad, y es observando cuanto tiempo la señal se encuentra disponible en el espacio, conocida como disponibilidad SIS. En este caso, los valores han de ser iguales al 100%. Este resultado se cumple para todos los meses de la validación, como se ve en la tabla 9.4.

<i>Disponibilidad SIS (%)</i>	Septiembre (2020)	Octubre (2020)	Noviembre (2020)	Diciembre (2020)	Enero (2021)	Febrero (2021)
PRN 123	99.99	99.92	100	99.98	99.99	100
PRN 136	99.99	99.99	100	99.97	99.99	99.99
PRN 123 o PRN 136	100	100	100	100	100	100

Tabla 9.4: Resultados de la disponibilidad SIS del estudio de largo plazo

9.1.4 Resultados de continuidad

La continuidad se entiende a la hora de su evaluación como el valor resultante de dividir la cantidad de fallos de continuidad entre el número de muestras obtenidas, durante 15 segundos. Asimismo, se determina por la OACI que ese índice ha de estar situado entre $1 - 8 \cdot 10^{-6} / 15s$. Sin embargo, como se muestra a continuación, estos valores no se logran por parte de EGNOS en la isla de Gran Canaria.

<i>Continuidad LPV-200 (%)</i>	Septiembre (2020)	Octubre (2020)	Noviembre (2020)	Diciembre (2020)	Enero (2021)	Febrero (2021)
Continuidad (%/15s)	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$

Tabla 9.5: Resultados de la continuidad del estudio de largo plazo

No obstante, el anexo 10 de la OACI, consciente de la baja continuidad existente en todo el entorno del sistema EGNOS, detalla que esta falta de continuidad puede ser obviada siempre y cuando se disponga de sistemas adicionales que mitiguen los efectos de este déficit de continuidad, como es el caso del aeropuerto de Gran Canaria, como se expondrá más adelante cuando se explique en detalle las características de este aeropuerto.

Asimismo, del mismo modo que los resultados de disponibilidad, los resultados de continuidad vienen expuesto en un mapa como el siguiente, referido al mes de septiembre de 2020.

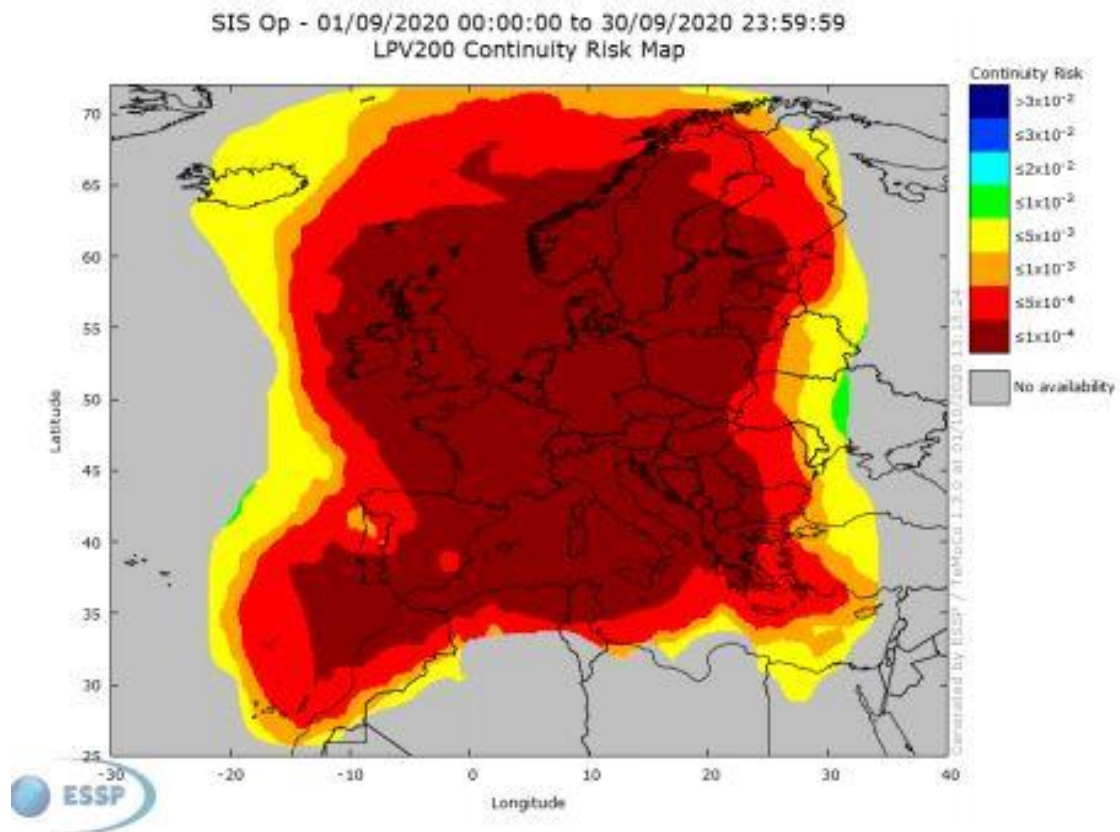


Figura 9.5: Mapa mostrando la continuidad del sistema en la región de Europa para el mes de septiembre [35]

9.2 Toma de datos a corto plazo

Una vez concluido el estudio a largo plazo, se pasa a la fase de corto plazo, en la cual los resultados se obtienen haciendo uso de la aplicación PEGASUS, como se ha explicado en el capítulo anterior. Además, se recuerda que esta parte de la validación tiene como espacio dos días posteriores al estudio de largo plazo y que, en este caso, son los días 5 y 6 de abril.

9.2.1 Resultados de precisión

Habiendo detallado en la parte de validación a largo plazo la forma en la que se obtiene el valor de la precisión, se pasa a mostrar los resultados de la segunda fase de la validación, teniendo en cuenta que los límites son 16 metros en cuanto al plano vertical, y 6 metros para el horizontal. Las figuras siguientes muestran los resultados con el formato que proporciona el *software* PEGASUS.

```

<name>HNSE</name>           <name>VNSE</name>
<service>LPV200</service>  <service>LPV200</service>
<samples>84099</samples>   <samples>84099</samples>
<mean>1.09151</mean>       <mean>0.572697</mean>
<rms>1.13398</rms>         <rms>0.713569</rms>
    
```

Figura 9.6: Resultados de precisión en el estudio a corto plazo del día 5 de abril

```

<name>HNSE</name>           <name>VNSE</name>
<service>LPV200</service>  <service>LPV200</service>
<samples>85240</samples>   <samples>85240</samples>
<mean>1.0803</mean>       <mean>0.650919</mean>
<rms>1.12874</rms>         <rms>0.849302</rms>
    
```

Figura 9.7: Resultados de precisión en el estudio a corto plazo del día 6 de abril

Asimismo, se muestra la siguiente tabla a modo de resumen de los resultados obtenidos:

<i>Precisión</i> <i>LPV-200 (%)</i>	5 de Abril	6 de Abril
HNSE (m)	1.091510	1.080300
VNSE (m)	0.572697	0.650919

Tabla 9.6: Resultados de precisión en el estudio a corto plazo

Finalmente, se observa que los valores se encuentran dentro de los límites.

9.2.2 Resultados de integridad

Los resultados del estudio de la integridad se obtienen con un formato de histograma tanto para los índices de seguridad como para los errores de posición. Estos histogramas, junto con el diagrama de Stanford de cada uno de los planos verticales y horizontales conforman la solución para cada uno de los días. Se recuerda que los valores relativos a la integridad no han de superar la unidad.

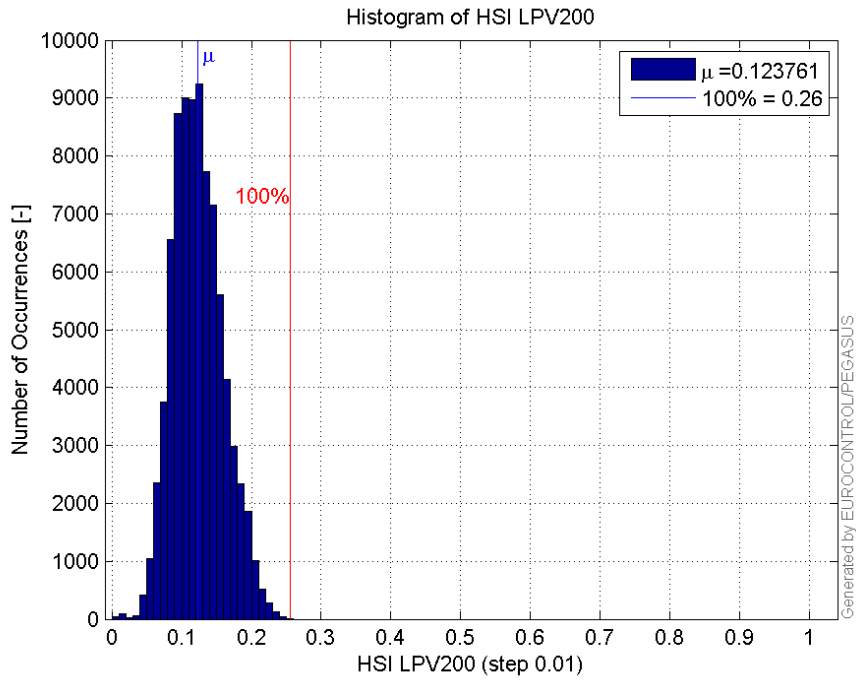


Figura 9.8: Resultados del HSI en el estudio a corto plazo del día 5 de abril

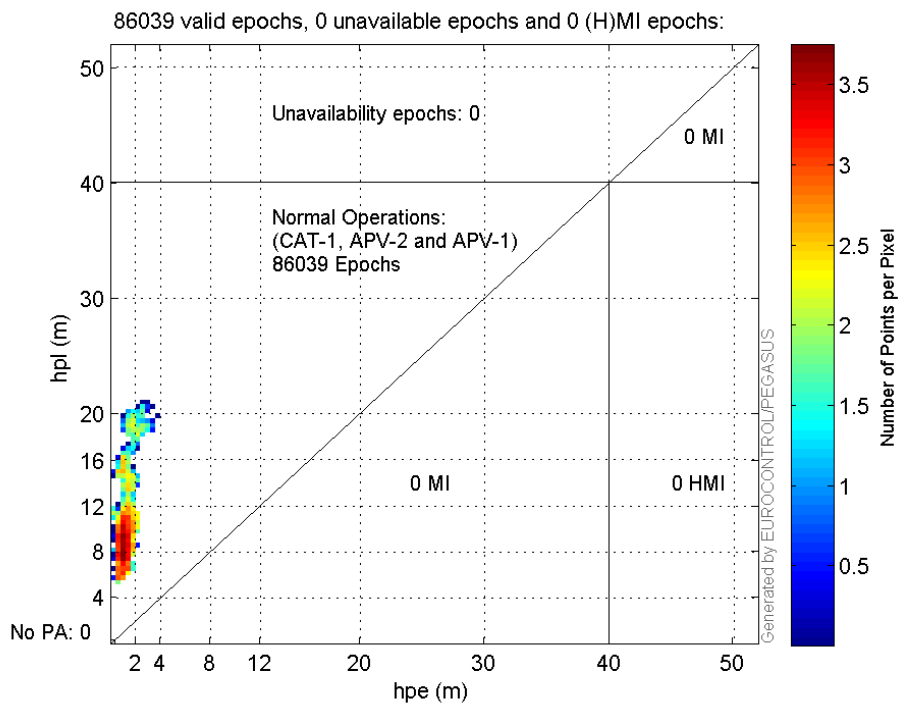


Figura 9.9: Diagrama de Stanford horizontal del estudio a corto plazo del día 5 de abril

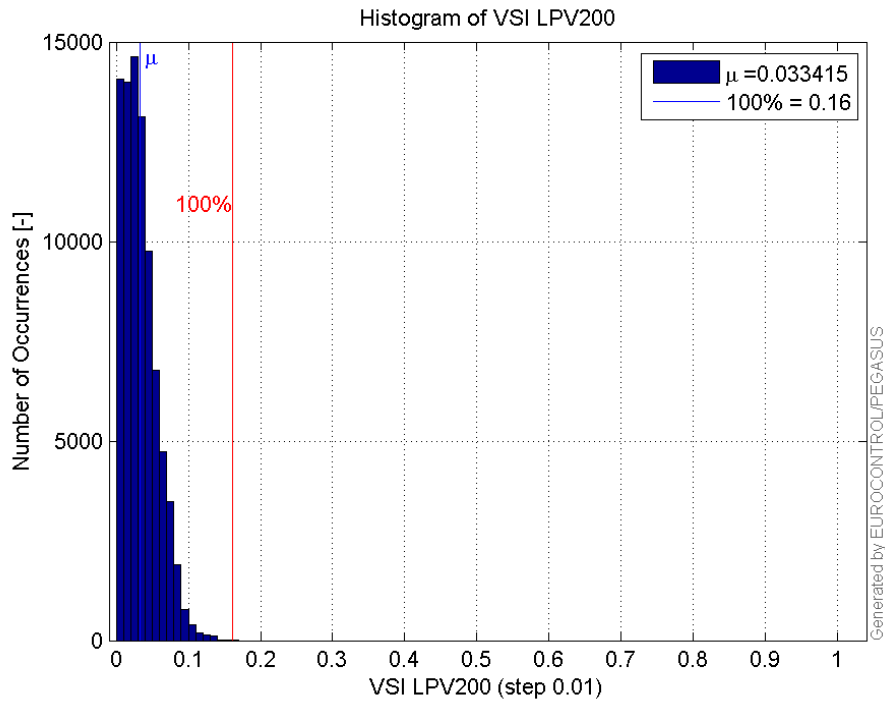


Figura 9.10: Resultados del VSI en el estudio a corto plazo del día 5 de abril

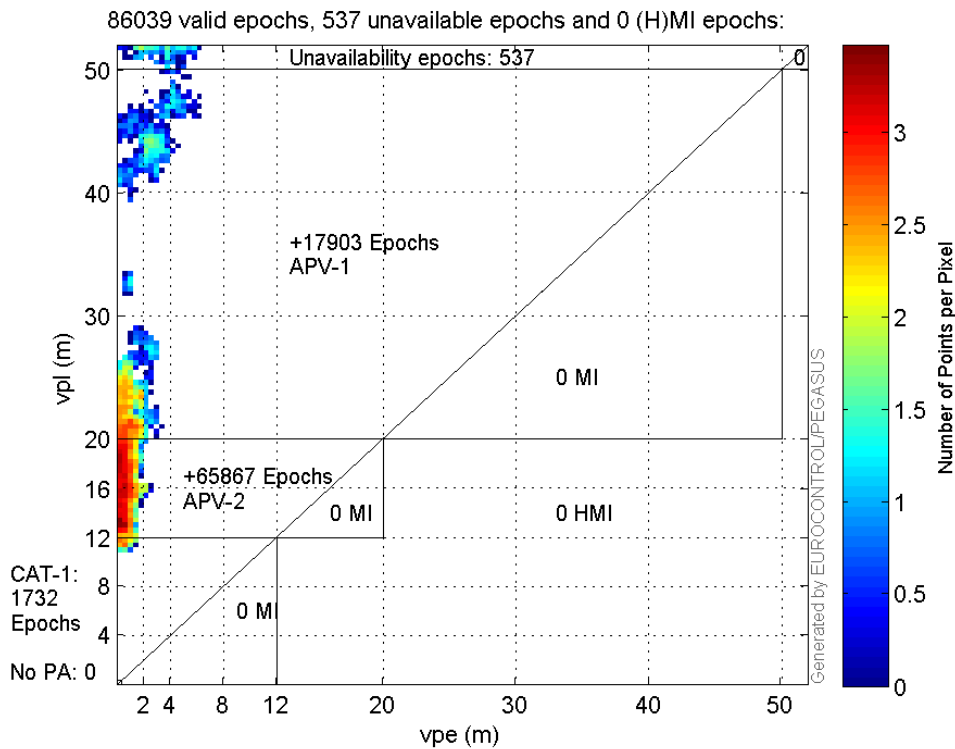


Figura 9.11: Diagrama de Stanford vertical del estudio a corto plazo del día 5 de abril

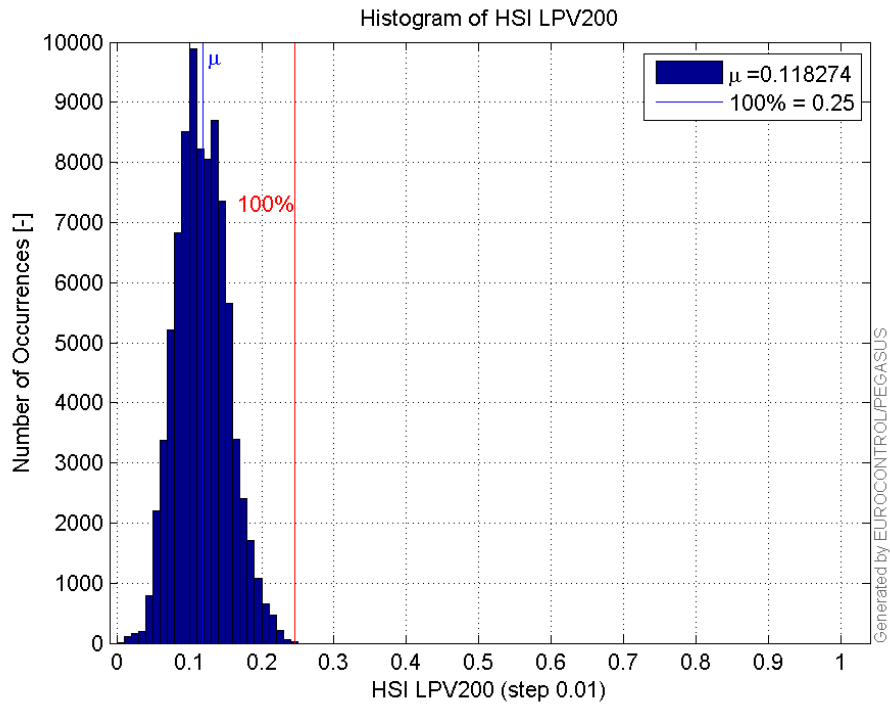


Figura 9.12: Resultados del HSI en el estudio a corto plazo del día 6 de abril

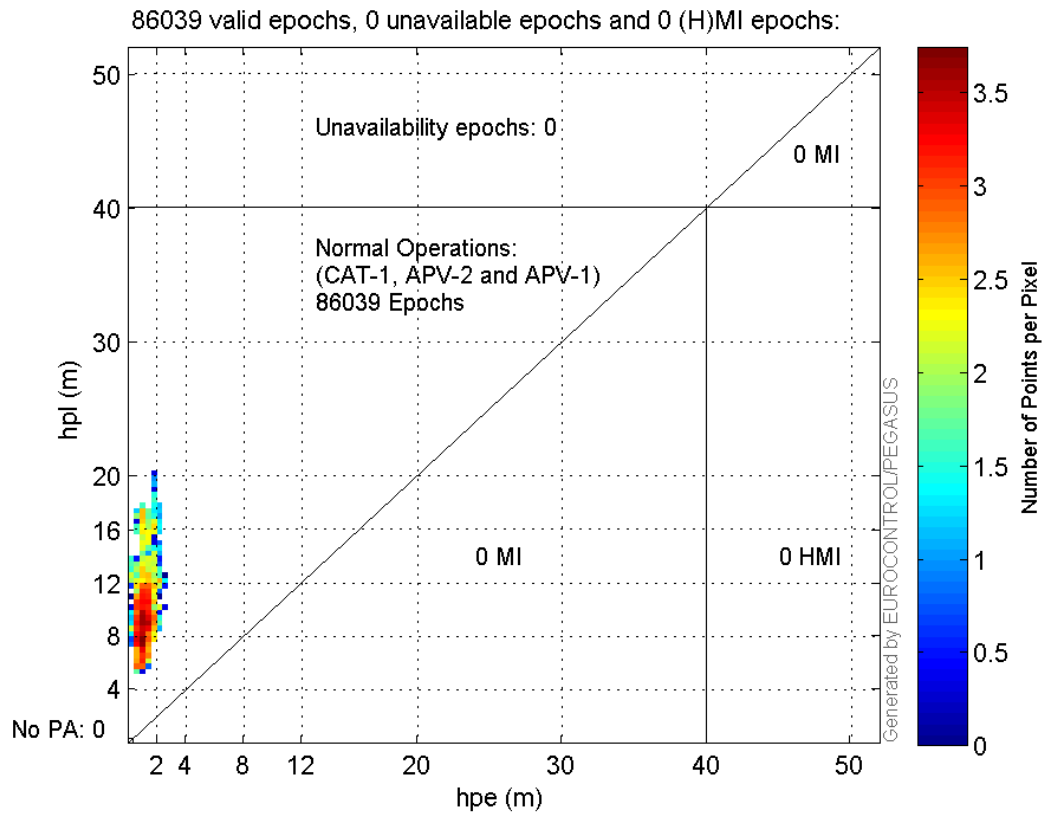


Figura 9.13: Diagrama de Stanford horizontal del estudio a corto plazo del día 6 de abril

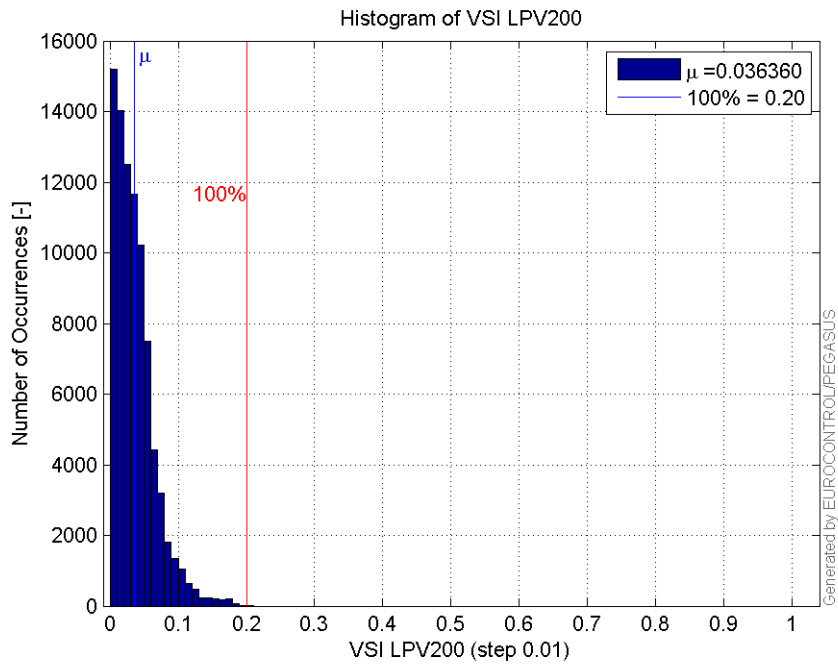


Figura 9.14: Resultados del VSI en el estudio a corto plazo del día 6 de abril

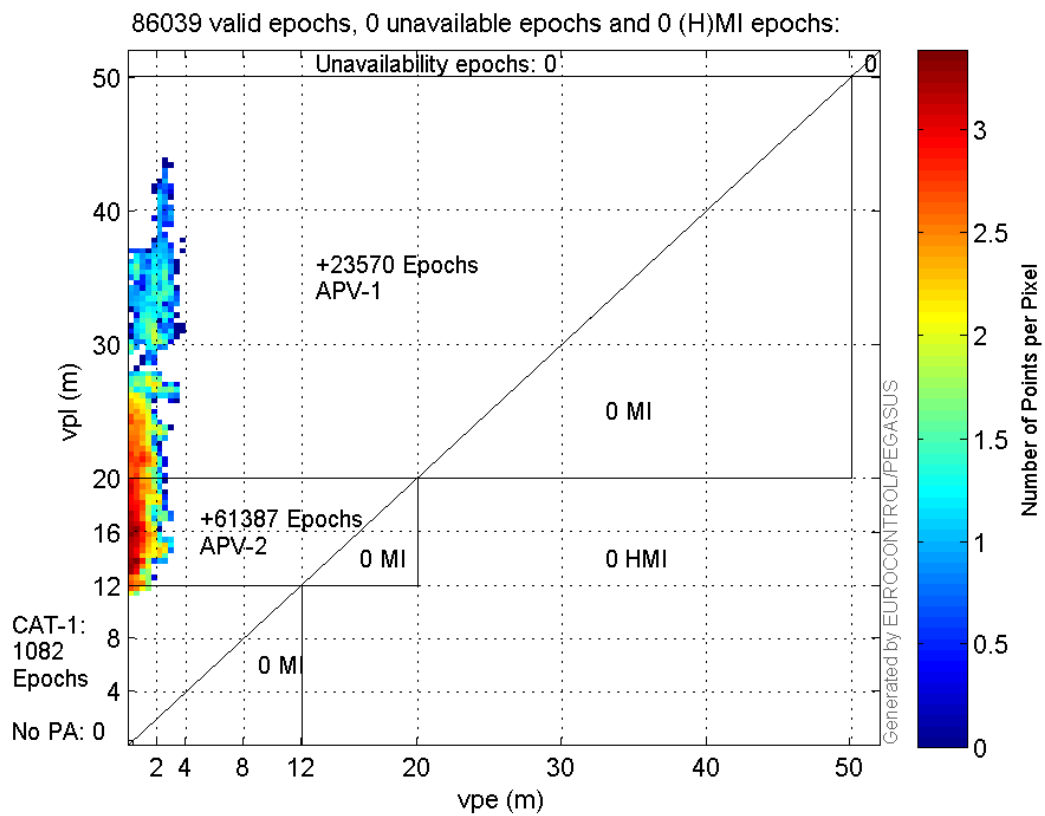


Figura 9.15: Diagrama de Stanford vertical del estudio a corto plazo del día 6 de abril

A modo de resumen, la tabla que se puede observar a continuación, muestra los valores obtenidos para cada uno de los días.

Índices de seguridad	5 de Abril	6 de Abril
Horizontal	0.123761	0.118274
Vertical	0.033415	0.036360

Tabla 9.7: Resultados de integridad en el estudio a corto plazo

Eventualmente, se concluye que los resultados obtenidos en relación a la integridad son suficientemente buenos.

9.2.3 Resultados de disponibilidad

Estos resultados proceden de la página web de EGNOS *User Support*, haciendo uso del apartado correspondiente a la *Historical Performance*. Del mismo modo que los resultados de la disponibilidad de la parte de la validación a largo plazo, estos resultados también se ofrecen en forma de mapa coloreado gradualmente en función del valor de la integridad en cada zona del mapa. Cabe recordar, además, que los valores de disponibilidad no se pueden encontrar por debajo del 99% establecido por la OACI.

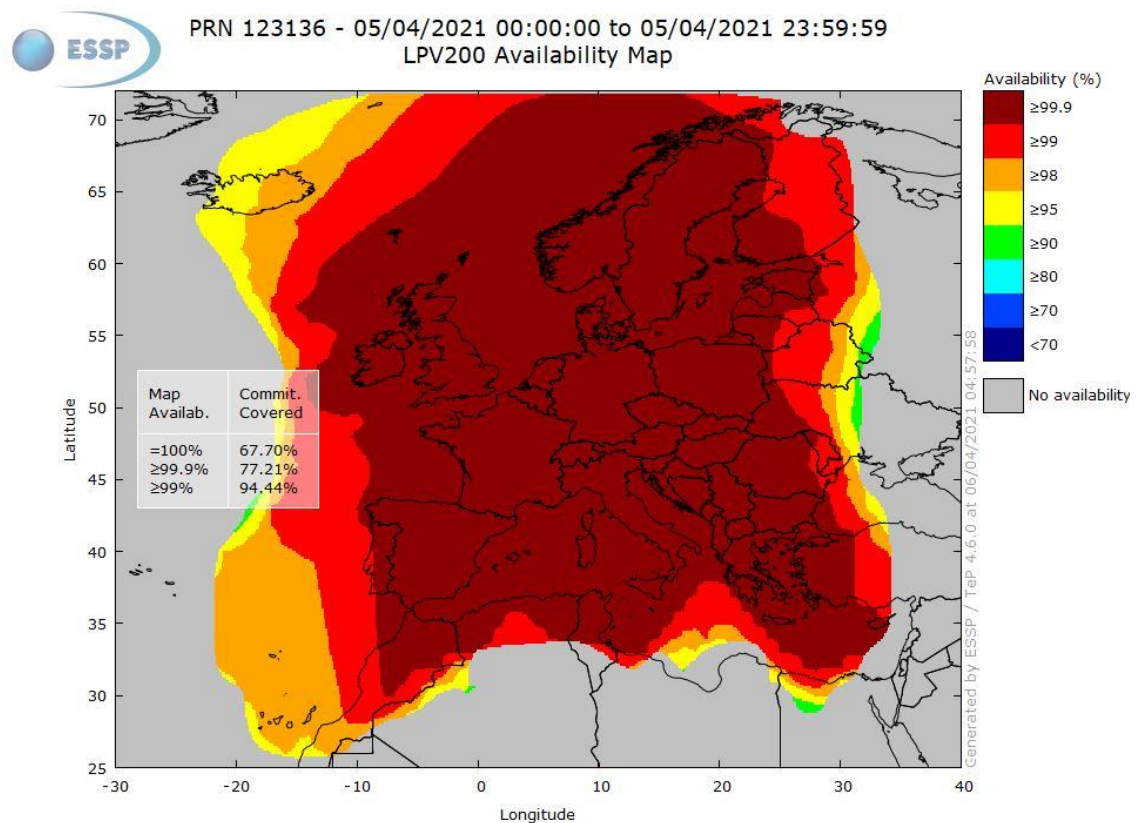


Figura 9.16: Resultados de disponibilidad en el estudio a corto plazo del día 5 de abril

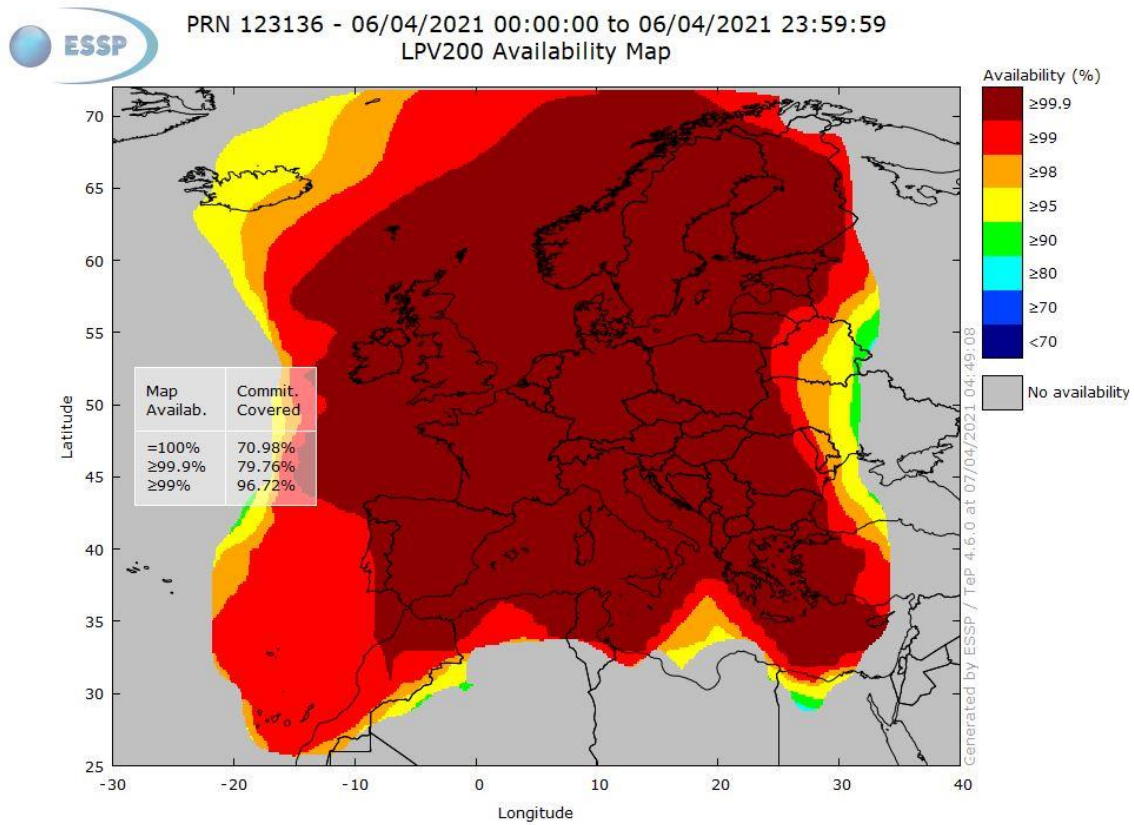


Figura 9.17: Resultados de disponibilidad en el estudio a corto plazo del día 6 de abril

Por otra parte, como resultado del uso del *software* PEGASUS se obtienen directamente los valores, que resultan idénticos a los anteriores, pero precisan una mayor precisión. Los resultados resumidos se muestran a continuación.

Disponibilidad LPV-200 (%)	5 de Abril	6 de Abril
PRN 123	≈ 98	≈ 99
PRN 136	≈ 98	≈ 99
Combinados	≈ 98	≈ 99

Tabla 9.8: Resultados de disponibilidad en el estudio a corto plazo

De este modo, se observa que durante un día los valores de disponibilidad no cumplen con los mínimos establecidos. Así, al igual que en el estudio de largo plazo, se concluye que esta validación resulta incompleta debido a la falta de disponibilidad, lo cual provoca que no se siga con el estudio de la validación y la campaña sobre el terreno resulte desestimada.

9.2.4 Resultados de continuidad

Finalmente, siguiendo un proceso completamente parejo al de obtención de los valores de disponibilidad, a la hora de obtener los resultados de continuidad se opta por mostrar en primer lugar los mapas obtenidos de la web de EGNOS *User Support*. Se recuerda que los valores mínimos que exige la OACI para los índices de continuidad son de $1 - 8 \cdot 10^{-6} / 15s$.

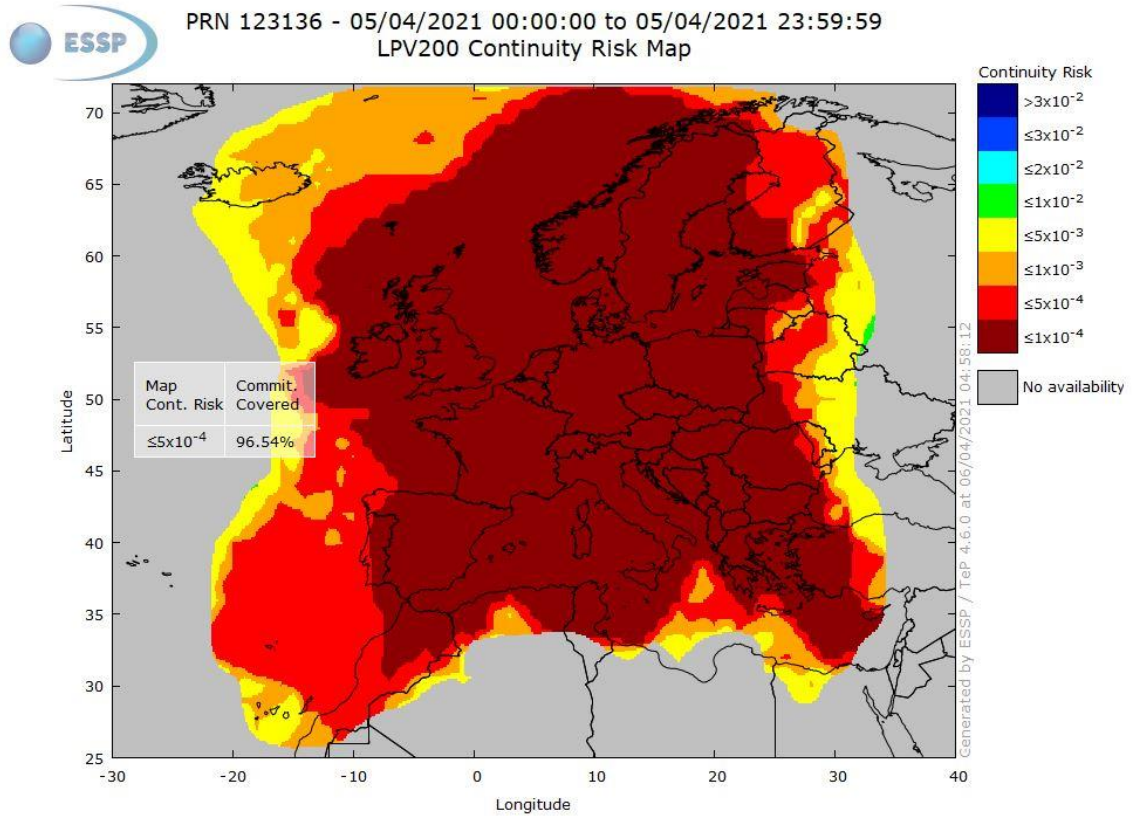


Figura 9.18: Resultados de continuidad en el estudio a corto plazo del día 5 de abril



PRN 123136 - 06/04/2021 00:00:00 to 06/04/2021 23:59:59
LPV200 Continuity Risk Map

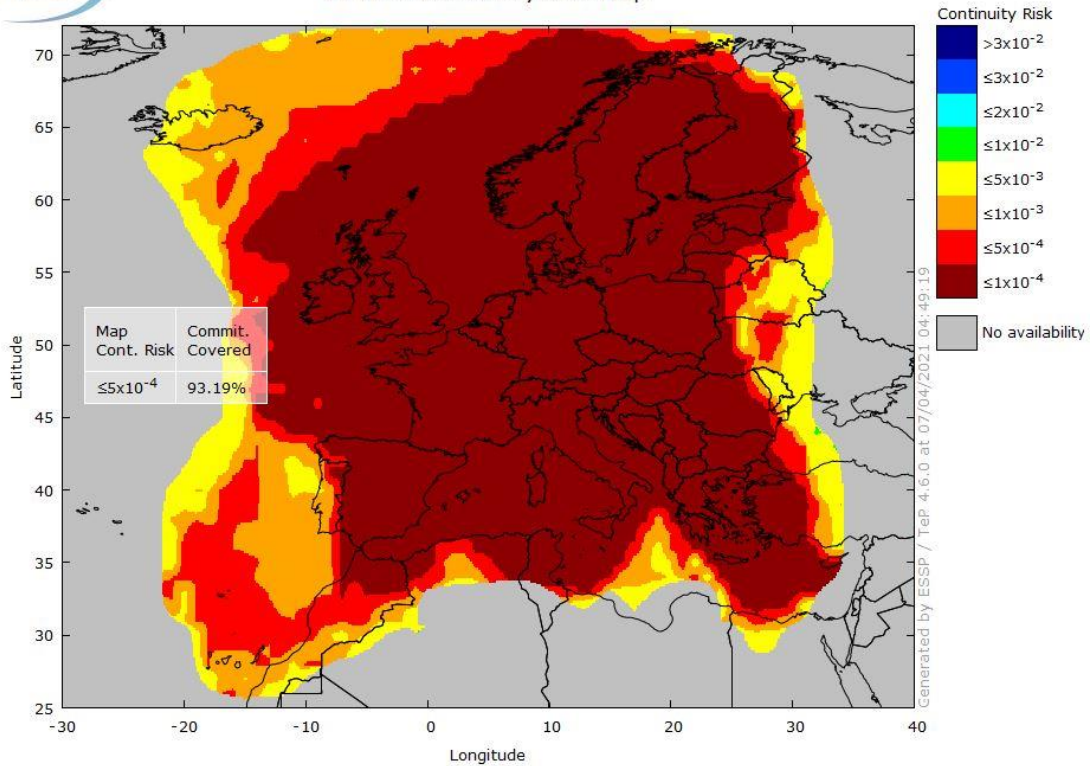


Figura 9.19: Resultados de continuidad en el estudio a corto plazo del día 6 de abril

Al igual que con la disponibilidad, la aplicación PEGASUS ofrece mayor exactitud en sus resultados. No obstante, ambos valores son muy parejos y constituyen el mismo resultado. A continuación, se muestran de forma resumida los resultados de continuidad para cada uno de los días.

<i>Continuidad LPV-200 (%)</i>	5 de Abril	6 de Abril
Continuidad (%/15s)	$\leq 5 * 10^{-3}$	$\leq 1 * 10^{-3}$

Tabla 9.9: Resultados de continuidad en el estudio a corto plazo

Y, al igual que en la fase de largo plazo, en este caso la continuidad tampoco resulta lo suficientemente buena, aunque se puede solventar empleando sistemas adicionales, como se ha explicado previamente.

Capítulo 10

Conclusiones sobre la validación de la aproximación

A lo largo de la primera parte práctica de este trabajo, se ha procedido con la validación de la aproximación SBAS LPV-200 para la pista 21R del aeropuerto de Gran Canaria en su primera y segunda fase, dejando de lado su tercera fase, la campaña sobre el terreno, que ha resultado desestimada una vez conocidos los resultados obtenidos de las dos primeras fases, que han mostrado el incumplimiento de los requisitos establecidos por la OACI en el entorno del aeropuerto de Gran Canaria.

Con este fin, el primer paso a completar ha sido el estudio de los diferentes formatos establecidos para los mensajes dentro del entorno de la aviación, poniendo especial atención en el formato de mensajes RINEX, ya que se trata del tipo de mensaje de uso a lo largo de la evaluación.

En segundo lugar, se ha explicado cada una de las aplicaciones que han sido usadas durante el desarrollo del proyecto. Se ha detallado con gran precisión cada *software* usado, destacando entre ellos PEGASUS, la aplicación especialmente diseñada para este fin, que ha sido de gran utilidad a la hora de obtener los resultados de la validación.

Finalmente, como desenlace de esta parte del trabajo, se han expuesto los resultados finales para las fases de validación a largo plazo, en una primera instancia, con una extensión en el tiempo de 6 meses y, más tarde, la validación a corto plazo, con una extensión temporal de 2 días. Con estos dos estudios ha resultado suficiente para considerar insuficientes los resultados obtenidos y no proceder así con la tercera parte de la validación.

A partir de los resultados obtenidos, se llega a la obtención de las conclusiones. Lo primero a comentar es el hecho de que este estudio se ha realizado también con el motivo de comprender hasta qué punto se puede ofrecer el sistema EGNOS a las Islas Canarias a pesar de formar parte de Europa, que es la zona a la que va dirigida este sistema.

Y llegan a tal punto las limitaciones de este sistema que, actualmente, la cobertura ofrece servicio a algunas de las islas de este archipiélago, dejando a las demás sin esta calidad de servicio. Por lo tanto, el esfuerzo del sistema EGNOS continúa dirigido a poder implementar una mayor cobertura para todas las Islas Canarias.

Finalmente, como consecuencias de la conclusión obtenida, se observa la reducción de posibilidades de aproximación dentro de los aeropuertos de las islas más

occidentales dentro del archipiélago. Estas islas no pueden disponer así de aproximaciones de nivel SBAS LPV-200 como sustituto a las aproximaciones de ILS CAT I, que podrían resultar inoperativas si sus sistemas se encontrasen fuera de servicio por cualquier motivo.

DOCUMENTO III
DISEÑO DE LA APROXIMACIÓN
SBAS LPV-200

Capítulo 11

Descripción general del diseño

En el capítulo actual se detalla de manera referencial las diferentes características que definen tanto al aeropuerto de Gran Canaria y sus alrededores, como la aeronave que se ha de elegir como aeronave de referencia, que servirá de muestra para definir los distintos parámetros relativos al diseño final.

11.1 Introducción

Una vez finalizada la validación de procedimientos y habiéndose obtenido las conclusiones relativas a esta, este proyecto continúa con el diseño de la aproximación en el aeropuerto de estudio, el de Gran Canaria.

Cabe recordar que la validación no ha resultado satisfactoria. Sin embargo, el funcionamiento del sistema EGNOS es cada vez mejor y con un rango de cobertura en aumento. Es por ello, que se ha decidido diseñar el procedimiento de aproximación con el fin de que en un futuro próximo este pueda ser llevado a cabo de forma útil, una vez se consigan los parámetros de disponibilidad requeridos.

A lo largo de este capítulo, en primer lugar, se comentan las propiedades del aeropuerto de Gran Canaria y, más adelante, se incide en la aeronave de referencia para que, una vez repasados todos los datos expuestos, en el posterior capítulo se pueda proceder con el diseño de la aproximación.

Para todo el proceso de diseño del procedimiento se usan a modo de manual de referencia los siguientes documentos creados por la OACI:

- Doc. 8168 (*Vol II*): Operación de aeronaves. Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos [41].
- Doc. 9613: Manual de navegación basado en la *performance* [42].

Estos dos documentos servirán de base para cada uno de los procesos a seguir a lo largo de esta tercera parte del proyecto, que finalizará con el diseño final de la aproximación para la pista 21 R del aeropuerto de Gran Canaria.

11.2 Aeropuerto de Gran Canaria

11.2.1 Generalidades

El Aeropuerto de Gran Canaria se encuentra situado en la isla de Gran Canaria, más específicamente en la Bahía de Gando, formando parte de las localidades de Telde e Ingenio. Esta zona de llegada de turistas y habitantes de la isla se halla a una distancia de 18 kilómetros de la capital de la isla, Las Palmas de Gran Canaria y a 25 kilómetros de Maspalomas, una de las atracciones turísticas principales de la ínsula [43].

En las figuras 11.1 y 11.2 se puede observar la situación del aeropuerto en relación a la capital de la isla, Las Palmas de Gran Canaria y los municipios más cercanos al mismo.



Figura 11.1: Situación del aeropuerto de Gran Canaria con respecto a los principales municipios de su entorno

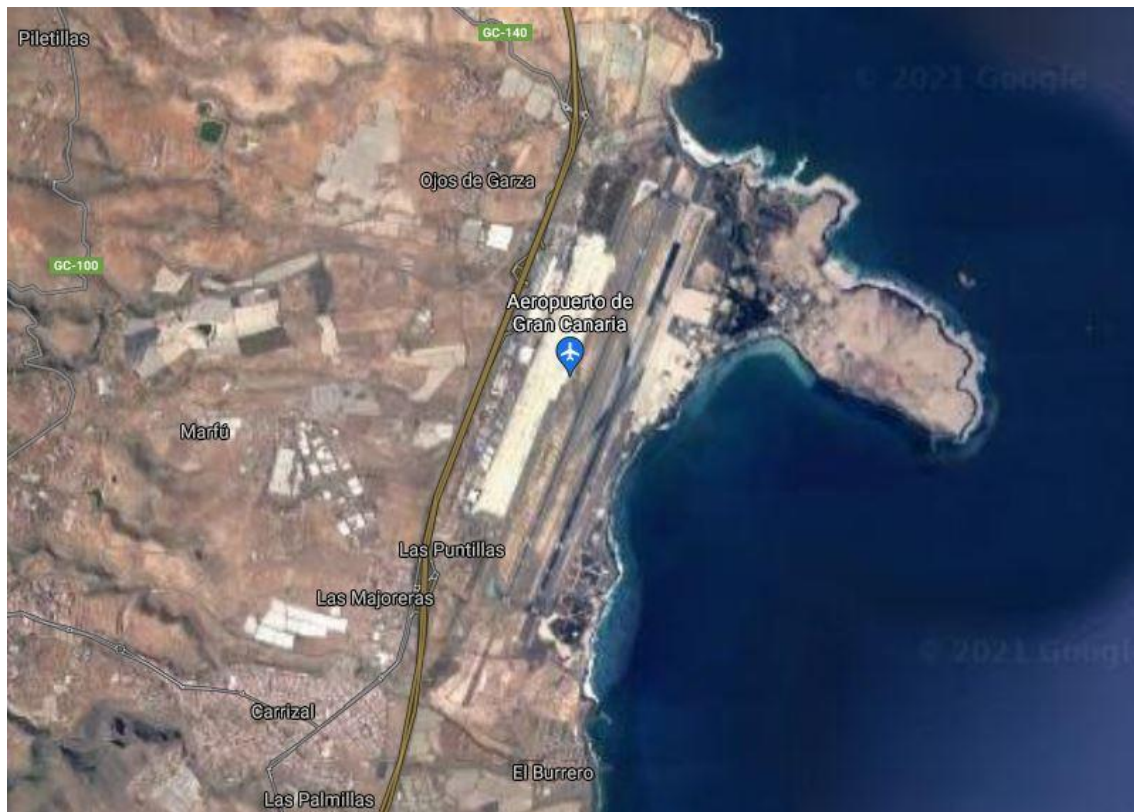


Figura 11.2: Vista aérea del aeropuerto de Gran Canaria

El origen de este aeropuerto data del año 1930, año en el cual el gobierno de España declara la creación de un aeropuerto nacional a partir de las instalaciones creadas en Gando con el fin de servir de punto intermedio entre Europa y Sudamérica. La situación geográfica de este enclave incentiva la construcción del aeropuerto y acelera su construcción. Tanto es así que en el año 1933 el aeropuerto experimenta su primer vuelo con pasajeros y, finalmente, en el año 1935 se crea la línea Madrid-Canarias, dando pie al crecimiento de este sector en la isla.

Actualmente, la isla de Gran Canaria constituye uno de los lugares turísticos más exitosos de España debido a su agradable clima y su peculiar orografía. Esto, unido con el interés histórico en utilizar la isla como punto de conexión tanto con África como con Sudamérica hacen que esta isla haya dispuesto desde sus orígenes de la última tecnología en cuanto a aviación se refiere.

En el año 1960, la medida de la pista existente se incrementa desde los 2000 a los 3100 metros, haciendo que el aeropuerto pase de segunda a primera categoría. Los códigos por lo que se hace referencia a este aeropuerto son GCLP en cuanto a OACI se refiere y LPA para la IATA. La temperatura de referencia característica de este aeropuerto es de 28 °C y cuenta con una altitud de 24 metros sobre el nivel del mar [44].

Por otra parte, el Aeropuerto de Gran Canaria forma parte del aeródromo de utilización conjunta Gran Canaria / Gando. En este enclave se encuentra situado junto con el aeropuerto, la base aérea del Ejército del Aire de Gando y el Centro de Control

de Tránsito Aéreo de Canarias, haciendo de este lugar un punto de referencia dentro de las Islas Canarias.

Cabe destacar también que el Aeropuerto de Gran Canarias es el aeropuerto con mayor tráfico de las Islas Canarias. Sin embargo, esta isla no es la que más pasajeros recibe en forma de tráfico aéreo, ya que Tenerife dispone de 2 aeropuertos, uno en su parte sur y otro en su parte norte que, de manera conjunta, reciben una mayor cantidad de pasajeros.

El aeropuerto dispone de 2 pistas paralelas de orientación a 30 y 210 grados. Una de ellas, la 03L / 21R, dispone de sistemas que ofrecen aproximaciones ILS CAT I en ambos sentidos, siendo esta la pista que se utiliza de manera principal ocupando la gran mayoría del tráfico; la otra pista, 03R / 21L, no dispone de sistema ILS, por lo que se realizan aproximaciones visuales, siendo esta pista la utilizada por los aviones de carácter militar y usándose en condiciones de alto tráfico aéreo para agilizar las operaciones. Entre ambas pistas, se consigue llegar a ofrecer 53 operaciones por hora en el aeropuerto.

El aeropuerto de Gran Canaria, al igual que el resto de aeropuertos mundiales desde el mes de marzo de 2020 ha sufrido una gran bajada en la cantidad de operaciones debido a la situación epidemiológica provocada por el virus SARS-CoV-2. Por lo tanto, a la hora de estudiar su tráfico se han de usar los datos del año 2019. Observando dichos datos, se observa que el aeropuerto dispone de una cierta regularidad en el tráfico en termino estacionales, observando una leve estacionalidad con tendencia mayor en los meses de invierno, época en la cual las temperaturas de la isla son mucho más elevadas que las de los países de los cuales vienen sus turistas más populares: España, Alemania, Reino Unido o Noruega [44].

A la hora de entender la influencia de este aeropuerto, en 2019 se acogió a 13.3 millones de pasajeros en un total de 126000 operaciones. Estos datos nos muestran la continuación de una tendencia al alza que crece de manera lenta pero ininterrumpida, como se puede observar en la figura 11.3.

EVOLUCIÓN DEL TRÁFICO DE PASAJEROS			
Año	Pasajeros	Año	Pasajeros
2011	10.538.829	2016	12.093.646
2012	9.892.067	2017	13.092.475
2013	9.770.039	2018	13.573.304
2014	10.315.740	2019	13.261.228
2015	10.627.218	2020	5.134.372

Figura 11.3: Evolución del número de pasajeros en el aeropuerto de Gran Canaria [44]

Por otra parte, como características especiales del tipo de oferta que ofrece la isla de Gran Canaria, se observa que el 55% de los vuelos que llegan a la isla son internacionales y que la principal razón por la que se aterriza en este aeropuerto, con un 65% del total, es por motivos vacacionales.

Asimismo, el aeropuerto dispone de una infraestructura modular con el fin de optimizar los procesos que en él toman parte, y facilitando así el embarque y desembarque de pasajeros. Se pueden destacar entre sus infraestructuras ciertas características:

- Una única terminal dividida en 4 zonas de embarque:
 - Zona A: para vuelos interinsulares.
 - Zona B: vuelos domésticos a la Península.
 - Zona C: vuelos internacionales al Espacio Schengen.
 - Zona D: vuelos internacionales fuera del Espacio Schengen.
- 53 puertas de embarque divididas en las 4 zonas de embarque.
- 108 mostradores de *check-in*.
- 68 puestos de estacionamiento de aeronaves.
- 3535 puestos de estacionamiento de coches en forma de parking.
- Conexiones estables con las zonas principales de la isla.
- Todo tipo de servicios destinados a los turistas.

Por otro lado, cabe destacar que el aeropuerto, dentro del esfuerzo que propone AENA en toda su red, plantea para el año 2026 un plan de acción ecológico basado en 2 puntos principales: la neutralidad total del uso de carbono en el aeropuerto y la

consecución del abastecimiento total del aeropuerto por energía eléctrica proveniente de fuentes renovables.

11.2.2 Procedimiento de llegada actual en el aeropuerto

Actualmente, el Aeropuerto de Gran Canaria no dispone de ninguna aproximación SBAS, debido a que el servicio que ofrece el sistema EGNOS al conjunto de las Islas Canarias no es óptimo, por culpa de la situación geográfica en la que se encuentran.

Sin embargo, en la pista y sentido de estudio en este trabajo se dispone de la infraestructura para llevar a cabo aproximaciones ILS, llegando a ofrecer operaciones CAT I, como se puede ver en la figura 11.4, donde se observa la carta de aproximación por instrumentos para la pista 21 R en el Aeropuerto de Gran Canaria.

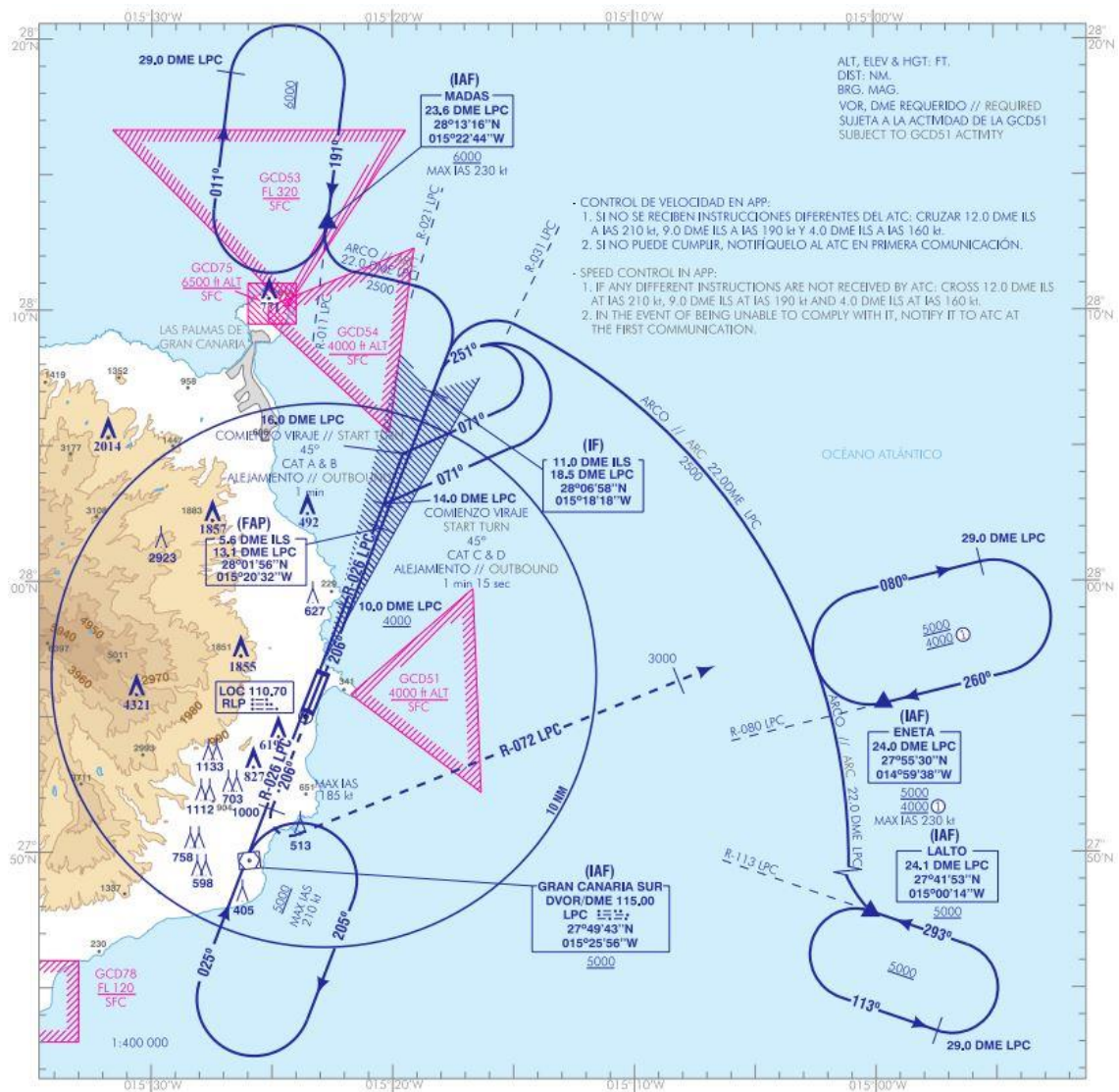


Figura 11.4: Extracto de la carta de aproximación por instrumentos del aeropuerto de Gran Canaria [45]

El diseño de una aproximación SBAS LPV-200 para esta pista supondría un pequeño avance en las operaciones que se ofrecen en ella. No obstante, la implantación de este tipo de aproximación supondría también una forma de redundancia en caso de que el sistema ILS dejase de funcionar debido a cualquier motivo, por lo que el diseño de la aproximación SBAS obtiene un valor añadido.

11.3 Aeronave elegida para el diseño de la aproximación

La aeronave elegida para el diseño de esta aproximación es el avión B747-400, parte de la flota de la compañía Boeing. Esta decisión viene dada por los 10 puestos de estacionamiento existentes en el Aeropuerto de Gran Canaria diseñados específicamente para esta aeronave, además de que se trata de uno de los aviones comerciales más grandes existentes, por lo que el estudio del mismo puede facilitar el diseño de aproximaciones de aviones de menor envergadura o incluso servir como su propia aproximación.

A continuación, se puede ver una instantánea de una aeronave de este tipo operada por la aerolínea Iberia en pleno despegue. Las características principales de esta aeronave se expondrán en el siguiente punto.



Figura 11.5: Boeing 747-400 de la compañía Iberia [46]

11.3.1 Características de la aeronave

Este apartado sirve como introducción a la historia de la aeronave elegida junto con las características que la han llevado a ser elegida como aeronave de referencia y a ser tan relevante en el mundo de la aviación.

El Boeing 747-400 es un avión comercial con estructura de fuselaje ancho, siendo la segunda versión más reciente de la familia de aviones 747, solo superada por el Boeing 747-800, comercializado por primera vez en 2012. Los aviones de esta familia fueron los aviones comerciales más grandes del mundo durante cuarenta años, haciéndoles obtener así el apodo de “Jumbo” y pasar uno de los aviones más famosos de la historia. Además, el avión Boeing 747 inicial destacó por ser pionero en ser aparte

del más grande, el más pesado, el primero en emplear la estructura de fuselaje ancho y el primero en utilizar motores *turbofan* con una alta relación de derivación, siendo así menos ruidosos y contaminantes que las aeronaves utilizadas anteriormente en este ámbito.

A la hora de centrarse en el Boeing 747-400 cabe mencionar que este es el avión más vendido dentro de la familia 747, llegando a construir una cantidad de 694 aeronaves. Este número de unidades fue elaborado entre los años 1988 y 2009, año en el que dejarían de construirse, para pasar a construir la siguiente edición dentro de la familia 747, el Boeing 747-800 [47].

Por otra parte, dentro de la aeronave Boeing 747-400 se encuentran diferentes variantes entre las que se encuentran la 747-400 original; la 747-400 F, empleada como versión destinada al transporte de carga; la 747-400 M, que se usaba como combinación de transporte de pasajeros y de carga; la 747-400 D, pensado con el fin de operar en trayectos domésticos, ofreciendo así un mayor volumen de espacio destinado a asientos para pasajeros; el 747-400 ER, de alcance extendido; el 747-400 ERF, como versión de carga del 747-400 ER; y el 747-400 BCF, que trataba de readaptar aeronaves de ámbito de carga para uso de transporte de pasajeros.

En las figuras 11.6 y 11.7 se puede observar la forma y dimensiones principales de esta aeronave para pasar al detalle de las características con una imagen previa del avión.

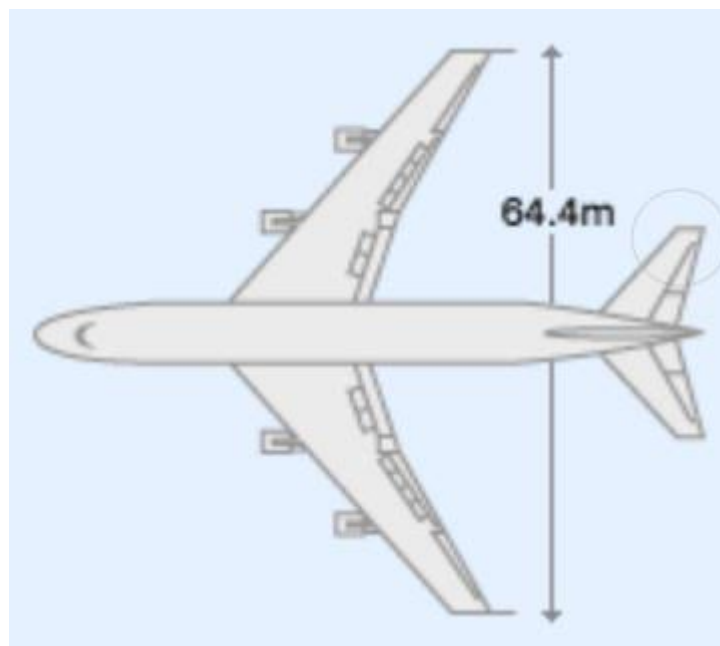


Figura 11.6: Vista en planta del Boeing 747-400 [48]

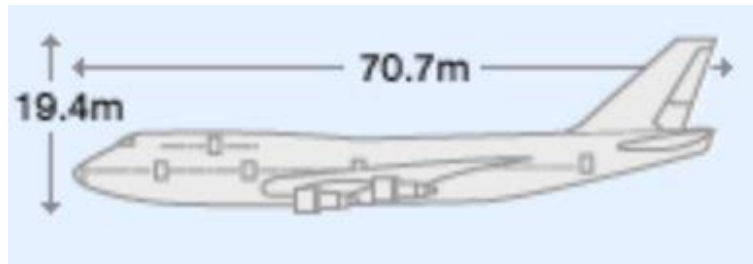


Figura 11.7: Vista lateral del Boeing 747-400 [48]

Como se ha mencionado, en la siguiente tabla se pueden observar las características relevantes del Boeing 747-400 [49].

Características B747-400	
Tripulación en cabina	Dos
Capacidad de pasajeros	660 (máximo)
Capacidad de carga (m ³)	112200
Longitud (m)	70.66
Envergadura (m)	59.64
Altura (m)	19.3
Peso en vacío (kg)	178800
Peso máximo al despegue (kg)	396890
Capacidad de combustible (l)	216840
Alcance (km)	13450
Velocidad de crucero (km/h)	912
Techo de vuelo (m)	13747

Tabla 11.1: Características del Boeing 747-400 [49]

Capítulo 12

Descripción general de la aproximación

Este capítulo trata de exponer de manera detallada los diferentes factores a considerar en cada una de las fases de la aproximación, así como la normativa establecida para cada una de ellas poniendo especial atención en la geometría y dimensiones de dicha aproximación.

12.1 Introducción

Como se ha comentado previamente, para realizar el diseño del procedimiento es suficiente con utilizar 2 documentos pertenecientes a la OACI, expuestos a continuación:

- Doc. 9613: Manual de navegación basada en la *performance*.
- Doc. 8168 (Vol. II): Operación de aeronaves. Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos.

Cada uno de estos documentos centra su atención en diferentes aspectos. El primero de los documentos, el Doc. 9613, ofrece la información relativa a los diferentes procedimientos que usan como base la navegación basada en la *performance*, exponiendo así los diferentes requisitos que se han de cumplir en las diversas aproximaciones tanto de tipo RNAV como RNP. Por supuesto, el tipo de aproximación de estudio en este trabajo se encuentra incluido en el documento.

En segundo lugar, el segundo volumen del Doc. 8168 sirve como base para las personas encargadas de diseñar las distintas operaciones a realizar por una aeronave, detallando tanto las áreas que se han de cubrir para cada uno de los tramos de la operación como las alturas de franqueamiento de obstáculos necesarias para cada uno de estos casos.

Finalmente, siguiendo las indicaciones conjuntas que se exponen en estos dos documentos, es posible completar el diseño de la aproximación SBAS LPV-200 en el aeropuerto de Gran Canaria. La propia aproximación será creada a modo visual en el entorno de Google Earth junto con sus respectivas áreas de protección de obstáculos y los márgenes a cumplimentar.

12.2 Fases de la aproximación

Cuando se trata de elaborar una aproximación para un aterrizaje, se ha de tener en cuenta que no se puede entender todo el proceso como una única operación, ya que

este se compone de fases y cada una de estas fases requieren de diferentes características, ya que ni la ubicación, ni la altitud es la misma. Es fácil entender que una aproximación consta de 3 fases, la aproximación inicial, intermedia y final. Sin embargo, existe una cuarta fase que puede parecer fuera de la aproximación, pero aun así es parte de ella, como es el tramo de aproximación frustrada, el cual es optativo, ya que se da en todas aquellas ocasiones en las que el aterrizaje resulte desestimado por condiciones desfavorables. En esos casos, el tramo de aproximación frustrada guía a la aeronave o bien de nuevo al tramo de aproximación inicial, con el fin de retomar la aproximación, o bien a otro aeropuerto en el cual sea más factible la ejecución de la maniobra [41].

Además, existe una quinta fase de la aproximación, previa a la fase de aproximación inicial, denominada la llegada normalizada (STAR). Esta fase sirve como nexo entre el tramo de en ruta, donde el avión vuela a una altitud y velocidad constante, y la propia aproximación, en la cual se reduce la altitud para poder seguir la senda que lleva a la pista del aeropuerto y hacer así efectivo el aterrizaje.

No obstante, a pesar de que la llegada normalizada forma parte de la aproximación, en este trabajo este tramo no se va a tener en cuenta por varios factores: el principal motivo para tomar esta decisión se basa en que el nuevo tipo de aproximación que se pretende diseñar (SBAS LPV-200) no requiere de diferentes características que otro tipo de aproximación por instrumentos que ya se han diseñado para esta pista; además la llegada normalizada depende en gran parte de la dirección de la que viene la aeronave, más que de la pista en la que se busca aterrizar, por lo que el diseño de una nueva llegada normalizada no aporta ningún valor a este trabajo, interesado más en hallar los parámetros de *performance* requeridos para una aproximación del tipo SBAS LPV-200.

Consecuentemente, la aproximación a diseñar se divide en las siguientes 4 fases:

- Tramo de aproximación inicial: se trata del tramo que se encuentra entre los puntos de referencia IAF (*Initial approach Fix*) e IF (*Intermediate Fix*).
- Tramo de aproximación intermedia: tramo comprendido entre el IF y el FAP (*Final Approach Point*).
- Tramo de aproximación final: va desde el punto de referencia FAP hasta el aterrizaje en la pista.
- Tramo de aproximación frustrada: comienza en el MAPt (*Missed Approach Point*), que es el punto desde en el cual se decide si se aterriza o se frustra, y está compuesto por un primer tramo de precisión, seguido por el tramo de no precisión, guiando a la aeronave de nuevo al IAF.

Con el fin de facilitar la comprensión de las distintas fases de la aproximación, se ofrece la figura 12.1, en la cual se puede observar de manera gráfica las partes de la aproximación.

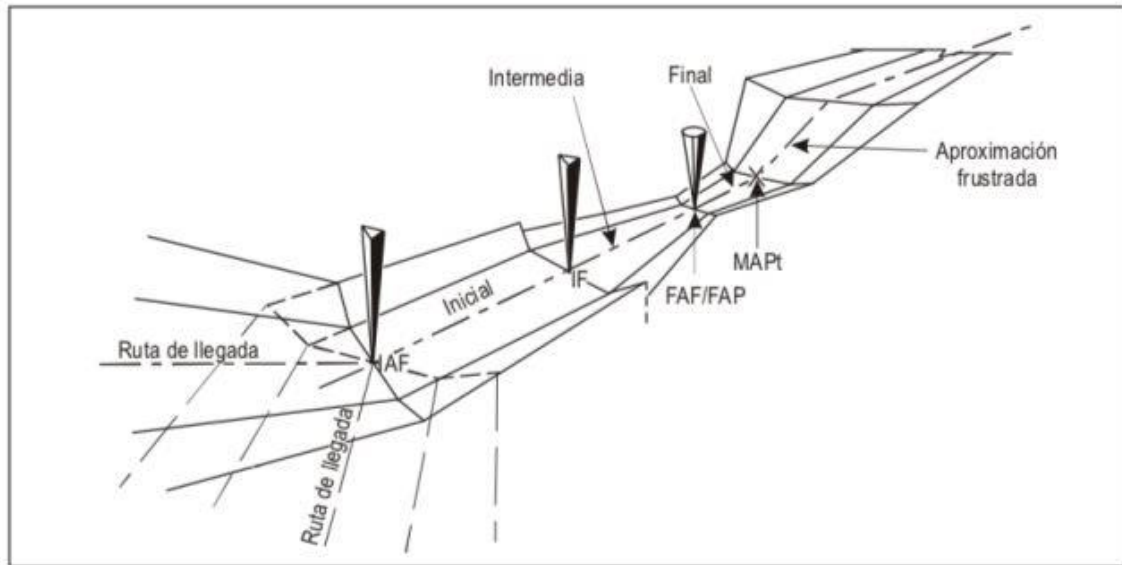


Figura 12.1: Tramos de la aproximación [41]

Finalmente, a los tramos ya comentados, deberá añadirse el área correspondiente al sobrevuelo del aeródromo en circuito y en operaciones que hacen uso del vuelo visual. Esta área y su diseño serán obtenidos a continuación, de manera conjunta con los demás tramos.

12.3 Factores asociados al diseño de la aproximación

Esta parte del capítulo consiste en la obtención de las medidas y parámetros que se han de cumplir en el diseño de esta aproximación. Todos estos cálculos, sin embargo, dependen de la categoría de la aeronave de referencia que se ha escogido para el procedimiento, por lo que el primer paso es ese, la determinación de la categoría de la aeronave.

12.3.1 Determinación de la categoría del B747-400

En cuanto a prestaciones de la aeronave se trata, uno de los puntos fundamentales es la velocidad. Tanto es así, que, basándose en algunas velocidades características de la aeronave, la OACI creó una clasificación que los divide así de forma normalizada con el fin de estandarizar el diseño de procedimientos y ofrecer soluciones grupales a cada categoría de aeronaves.

Para determinar a qué categoría pertenece cada aeronave se emplea la velocidad indicada en el umbral (V_{at}) de cada vehículo. La velocidad indicada en el umbral tiene dos formas de ser calculada: la primera de ellas se trata de obtener la velocidad de entrada en pérdida (V_{SO}) y multiplicarla por un factor de 1.3; y la segunda

utiliza la velocidad de pérdida (V_{s1g}) multiplicada por 1.23, siempre en configuración de aterrizaje y el peso máximo certificado.

En la tabla 12.1 se observan los límites de cada una de las 5 categorías decretadas por la OACI.

Categoría de Aeronave	Velocidad indicada (IAS)
A	<i>Menos de 169 km/h (91 kt)</i>
B	<i>Entre 169 km/h (91 kt) y 224 km/h (121 kt)</i>
C	<i>Entre 224 km/h (121 kt) y 261 km/h (141 kt)</i>
D	<i>Entre 261 km/h (141 kt) y 307 km/h (166 kt)</i>
E	<i>Entre 307 km/h (166 kt) y 391 km/h (211 kt)</i>

Tabla 12.1: Categorías de aeronave [41]

En el caso del avión de referencia de la aproximación que se trata de diseñar en este trabajo, el B747-400, la velocidad indicada en el umbral es de 283 kilómetros por hora, lo cual lo sitúa en la categoría de aeronave D, compartiendo clase con las aeronaves cuya velocidad indicada en el umbral vaya desde 261 y 307 kilómetros por hora [50].

12.3.2 Gama de velocidades asociadas a cada tramo

Después de precisar cuál es la categoría de aeronaves a la que pertenece la aeronave de referencia para la aproximación, se ha de resolver la velocidad que corresponderá a cada uno de los tramos del procedimiento. Esto se consigue empleando del Doc. 8168.

En la siguiente tabla se observa la Tabla I-4-1-1 del documento mencionado, en la cual se pueden distinguir cada una de la velocidad asociadas a cada tramo para cada categoría de aeronave.

Tabla I-4-1-1. Velocidades (IAS) para el cálculo de procedimientos en kilómetros por hora (km/h)

Categoría de aeronaves	V_{at}	Gama de velocidades para aproximación inicial	Gama de velocidades para aproximación final	Velocidades máximas para maniobras visuales (en circuito)	Velocidades máximas para aproximación frustrada	
					Intermedia	Final
A	<169	165/280 (205*)	130/185	185	185	205
B	169/223	220/335 (260*)	155/240	250	240	280
C	224/260	295/445	215/295	335	295	445
D	261/306	345/465	240/345	380	345	490
E	307/390	345/467	285/425	445	425	510
H	N/A	130/220**	110/165***	N/A	165	165
Cat H (PinS)***	N/A	130/220	110/165	N/A	130 ó 165	130 ó 165

Tabla 12.2: Velocidades asociadas a cada uno de los tramos de la aproximación [41]

Para el cálculo y diseño de la aproximación, en el caso de existan 2 opciones a elegir dentro de las velocidades de cada tramo, se usará la velocidad mayor, con el fin de ofrecer mayor seguridad al procedimiento.

12.3.3 Protecciones asociadas a cada tramo

Cada uno de los tramos de la aproximación ha de ser capaz de demostrar un nivel de seguridad acorde con la operación. Es por ello que para cada uno de estos tramos se presentan distintas protecciones basándose en la distancia para el franqueamiento de obstáculos.

Estas protecciones se basan en determinar unas ciertas superficies horizontales a cada uno de los lados de la trayectoria de la aeronave de tal forma que ningún obstáculo supere esa altitud dentro de los límites de dicha superficie, garantizando así la seguridad de la aproximación.

Tiene sentido que los obstáculos a medida que se alejan de la trayectoria nominal de la aproximación puedan ser mayores. Es por ello, que en la mayoría de ocasiones se divide la superficie en un área primaria y otra secundaria. El parámetro que determina la anchura de la superficie es el conocido como semianchura del área ($1/2A/W$) que se define por la siguiente fórmula:

$$1/2A/W = 1,5 \cdot XTT + BV$$

Donde:

- XTT: Valor de la tolerancia perpendicular a la derrota 2σ .
- BV: Conocido como valor intermedio, su valor varía en función del tramo y la especificación de la aproximación (RNAV o RNP).

En el caso de este trabajo, se trata de una aproximación RNP APCH, para la cual se han determinado los valores de la siguiente tabla, extraídos del Doc. 8168 de la OACI.

Tabla III-1-1-3. Valores intermedios

<i>Fase de vuelo</i>	<i>BV para CAT A-E</i>	<i>BV para CAT H</i>
En ruta, SID y STAR [mayor o igual que 56 km (30 NM) respecto del ARP de salida o destino]	3 704 m (2,0 NM)	1 852 m (1,0 NM)
Terminal [STAR y aproximaciones inicial e intermedia menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP; y SID y aproximaciones frustradas menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP, pero mayores que 28 km (15 NM) respecto del ARP]	1 852 m (1,0 NM)	1 296 m (0,7 NM)
Aproximación final	926 m (0,5 NM)	648 m (0,35 NM)
Aproximaciones frustradas y SID de hasta 28 km (15 NM) respecto del ARP	926 m (0,5 NM)	648 m (0,35 NM)

Tabla 12.3: Valores intermedios para cada uno de los tramos de la aproximación [41]

De la misma forma, se pueden obtener los valores del XTT para este tipo de aproximación haciendo uso del manual.

Sin embargo, este cálculo no resulta de gran importancia, ya que el propio manual proporciona los valores finales de la semianchura del área al mismo tiempo que ofrece los valores de XTT, ya que la semianchura del área depende únicamente del tipo de aproximación que se realice. Los valores que servirán a lo largo de este trabajo se pueden observar en la tabla 12.4.

Tabla III-1-2-13. XTT, ATT y semianchura del área para RNP APCH (aviones) en las fases de vuelo de aproximación inicial/intermedia/final y de aproximación frustrada (m)

<i>IF/LAF/aproximación frustrada (<56 km del ARP)</i>			<i>FAF</i>			<i>MAPt/aproximación frustrada inicial en línea recta (LP/LPV solamente)</i>			<i>Aproximación frustrada (<28 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
1 852	1 482	4 630	556	444	2 685	556	444	1 759	1 852	1 482	3 704

Tabla 12.4: Semianchura del área para cada uno de los tramos de la aproximación [41]

En este caso específico, se hará uso únicamente de los valores relativos a los tramos de aproximación inicial, intermedia y frustrada, dejando en desuso el valor del tramo de aproximación final. Esto se debe a que el tramo final, de precisión, varía con respecto a los demás tramos por tratarse de una aproximación SBAS, que equivale a Categoría I de ILS. Los pasos a seguir para el correcto diseño de ese tramo se encuentran en la parte III-3-5 del Doc. 8168 de la OACI.

Una vez definidas las superficies de franqueamiento de obstáculos y su extensión en el caso de este trabajo, se pasa al estudio de los márgenes que vayan relacionados a cada una de las áreas de protección a diseñar en el procedimiento. Estos márgenes son diferentes para cada uno de los tramos, distinguiendo sus valores también entre el área primaria y secundaria de cada parte.

El sentido de estas diferencias recae en la distancia del avión a cada una de las áreas, ya que en la gran mayoría del tiempo este se va a encontrar en la trayectoria nominal y, por lo tanto, en el área primaria de cada superficie. Tanto el área primaria como secundaria son simétricas con respecto a la trayectoria nominal y ocupan cada una la mitad de la extensión del área total, diferenciándose en que el área primera ocuparía los 2 cuartos del área más cercana a la trayectoria nominal, y la secundaria, los dos cuartos más lejanos. Con el fin de facilitar el entendimiento de la posición de las superficies, se puede observar la figura 12.2.

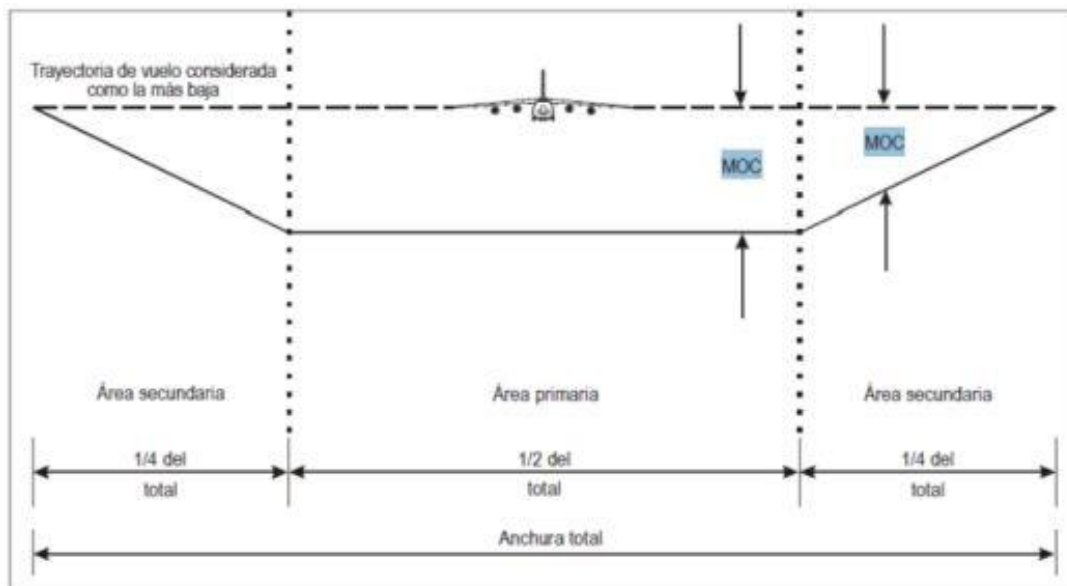


Figura 12.2: Áreas primaria y secundaria [41]

A continuación, se detallan los valores para los márgenes de franqueamiento de obstáculos (MOC) relativos a las partes de la aproximación que son de no precisión para el área primaria y secundaria de cada una.

- Aproximación inicial y circuito de espera: En el área primaria el valor del margen para el franqueamiento de obstáculos es de 300 metros. En el área secundaria se comienza en 300 metros en su límite con el área primaria hasta llegar a los 0 metros del límite contrario.
- Aproximación intermedia: Se aplica la misma forma de uso de los valores de los márgenes de franqueamiento de obstáculos, yendo desde los 150 metros del área primaria hasta los 0 metros del área secundaria.

- Aproximación frustrada (fase intermedia): De la misma manera, el margen cambia desde los 30 metros relativos al área primaria hasta los 0 metros del límite contrario.
- Aproximación frustrada (fase final): Siguiendo la misma pauta, en este caso los valores van desde los 50 metros del área primaria a los 0 metros del límite exterior.

En cuanto a los tramos de precisión de la aproximación, sus márgenes de franqueamiento de obstáculos vienen determinadas por las OAS (Superficies de evaluación de obstáculos), basados en 6 planos diferentes, relacionados a pares, conformando los límites de vuelo con una gran precisión. Con el fin de determinar estos planos, se puede hacer uso del *software* PANS-OPS, en el cual se facilita en gran manera el proceso de evaluación de los obstáculos y su posible penetración en las superficies. Una vez evaluadas las superficies, se podrá determinar el margen de franqueamiento de obstáculos para ese tramo, conocido como OCA/H.

12.3.4 Cálculo de la velocidad verdadera

A la hora de realizar los cálculos relativos al diseño de la aproximación, se requiere del empleo de la velocidad verdadera, en lugar de la velocidad indicada en la que se suelen obtener los valores en los documentos oficiales de la OACI. Es por ello, que para cada valor de velocidad indicada del que se disponga se habrá de transformar a velocidad verdadera haciendo uso de la fórmula que se detalla a continuación, extraída del Doc. 8168 de la OACI.

$$TAS = IAS \cdot 171233 \cdot \frac{((288 \pm VAR) - 0,006496H)^{0,5}}{(288 - 0,006496H)^{2,628}}$$

En la que:

- TAS: Velocidad verdadera (km/h).
- IAS: Velocidad indicada (km/h).
- VAR: Diferencia de temperatura en relación a la atmósfera estándar (°C).
- H: Altitud (m).

12.3.5 Protección de virajes

Existen tres formas de construcción de la protección de virajes, cada una con un determinado propósito. Estas dependen de una serie de características del movimiento de la aeronave que se detallan a continuación:

- Viraje en un punto de viraje (Viraje TP): Este tipo de viraje se estructura alrededor de un punto de referencia por el que se ha de pasar dentro de la ruta. Más allá

del punto de viraje, este tipo de viraje, se divide en 2 subtipos diferenciados por el ángulo de viraje y el tramo en el que se vire:

- Método de espiral de viento / círculos limitadores: El empleo de este método se ha de producir cuando se sobrevuele un IAF o IAF y se halla de virar con un ángulo mayor de 30º; o en el caso en que se sobrevuele el FAF con un ángulo mayor de 10º. Por otra parte, en el caso de la aproximación frustrada siempre se ha de emplear este tipo de viraje, como se verá más adelante.
- Método de arco de círculo: Se emplea en los casos restantes, es decir, sobre un IAF o IF con un ángulo menor de 30º o sobre un FAF con ángulos menores a 10º.
- Viraje a una altitud / altura dada (Viraje TA/H): en los casos en los que el viraje se determina para una altitud constante el método que se habrá de emplear en cada una de las ocasiones es el método de espiral de viento o círculos limitadores.
- Viraje de radio constante a un punto de referencia (Viraje RF): para aquellas ocasiones en las que el viraje se haya de realizar siguiendo un radio constante en relación a un punto de referencia, se emplea un método especial para este tipo que se expone de manera detallada en el capítulo III-2-2-4 del Doc. 8168 de la OACI.

En esta ocasión, los 3 únicos virajes que se diseñarán a lo largo del desarrollo del procedimiento forman parte del tramo de aproximación frustrada, por lo que el método a estudiar y desarrollar es el método de espiral de viento o círculos limitadores. Por lo tanto, para proceder con un diseño completo de los virajes se definirán 3 puntos de referencia en el tramo de aproximación frustrada en los cuales se llevarán a cabo los virajes.

Tanto es así, que se pasa ahora a detallar de una manera más extensa el funcionamiento del método que se empleará en cada uno de los virajes de la aproximación. Este método se puede dividir en tres partes, facilitando así su diseño. La primera de las partes se detiene en la elaboración de la protección del límite exterior del viraje; la segunda trata del contrario, el límite interior; y, finalmente, en tercer lugar, se sitúan los puntos anterior y posterior de viraje.

12.3.5.1 Protección del límite exterior del viraje

Con el fin de contar con la mayor seguridad y protección dentro del viraje, como protección del límite exterior del viraje se hará uso de la espiral procedente del caso con viento más desfavorable a la situación de la aeronave. Por otra parte, a la hora de conectar el área primaria del tramo con el área primaria del tramo posterior, existirán dos posibilidades:

- En el caso de que la parte final del área primaria del propio viraje se encuentre contenida en el área primaria relativa al tramo siguiente, la conexión entre ellas

se elaborará siguiendo una línea con un ángulo de 15° con respecto a la derrota nominal del siguiente tramo, siempre siguiendo una trayectoria tangente a la espiral referente al giro.

- Para el caso contrario, en el cual la parte final del área primaria del viraje se encontrase contenida en el área primaria del tramo posterior, las áreas se conectarían siguiendo una línea que forme 30° con la derrota nominal del siguiente tramo, de manera tangente a la espiral del giro.

En cuanto a los virajes de paso se refiere, un factor que resulta de gran importancia es la capacidad de mantener la aeronave dentro de sus velocidades de referencia. Es por ello que se habrá de ampliar el límite exterior del viraje, diferenciando dos maneras de realizar el proceso:

- Cuando se trate de un viraje con un ángulo igual o menor que 90° , el área principal será ampliada siguiendo una paralela al tramo anterior al viraje junto con otra paralela al tramo siguiente, siempre quedando como una tangente al recorrido determinado por la espiral de viento referente a la velocidad máxima considerada.
- En el caso de que el viraje sea mayor de 90° , del mismo modo, se procederá con una tangente a la espiral del viento para la mayor velocidad, pero, en este caso, se emplearán una paralela a la derrota de acercamiento y una perpendicular a la misma derrota.

Por otra parte, a la hora de evaluar el área secundaria del viraje, se determina que esta área dispondrá de una anchura constante durante todo el proceso de viraje de valor igual a la anchura en el punto posterior de viraje. No obstante, en el caso de que la anchura de esta área fuese inferior a la anchura del tramo posterior, el área aumentaría con un ángulo de 15° hasta llegar a la misma anchura.

12.3.5.2 Protección del límite interior del viraje

De la misma manera que en apartados previos, el proceso a seguir se encuentra detallado en el Doc. 8168, y dice lo siguiente:

- En el caso de que el área primaria o secundaria del tramo previo al viraje se encuentre en el interior del área del siguiente tramo, el borde se ampliará a razón de un ángulo de 15° hasta llegar a describir la derrota nominal del tramo posterior al viraje.
- En todas aquellas ocasiones en que no se dé el caso previo, se seguirá una línea con un ángulo de valor igual a la mitad de la diferencia de los ángulos de derrota con comienzo en el punto de viraje más limitante debido a su posición con respecto al conjunto.

12.3.5.3 Situación de los puntos de viraje anterior y posterior

El viraje se determina haciendo uso de un punto anterior y otro posterior que determinan las áreas de protección. Dentro del Doc. 8168 de la OACI se encuentra la tabla III-2-2-1, con información útil para la determinación de estos dos puntos.

<i>Tipo de punto de recorrido</i>	<i>Criterios para los puntos de viraje anterior y posterior</i>
De sobrevuelo (Figuras III-2-2-3, III-2-2-6 y III-2-2-7)	Anterior: ATT antes del punto de recorrido. Posterior: ATT + tiempo de reacción del piloto + retardo de ángulo de inclinación lateral
De paso (Figuras III-2-2-2, III-2-2-4 y III-2-2-5)	Anterior: ATT+ distancia de inicio del viraje antes del punto de recorrido Posterior: Distancia de inicio de viraje – ATT – tiempo de reacción del piloto. (Si el valor es negativo, el punto está más allá del punto de recorrido).
Salida TA/H seguida de un tramo CF (Figura III-2-2-8)	Anterior: 600 m desde el extremo de comienzo de la pista. (El comienzo de la pista disponible para despegue/TORA). Posterior: El punto en que la superficie, que comienza a 5 m por encima del DER, alcanza la altitud requerida, en la PDG prescrita + tiempo de reacción del piloto + retardo de ángulo de inclinación lateral.
Salida TA/H seguida de un tramo DF (Figura III-2-2-9)	Anterior: 600 m desde el extremo de comienzo de la pista. (El comienzo de la pista disponible para despegue/TORA). Posterior: El punto en que la superficie, que comienza a 5 m por encima del DER, alcanza la altitud requerida, en la PDG prescrita + tiempo de reacción del piloto + retardo de ángulo de inclinación lateral.
TA/H aproximación frustrada (Figura III-2-2-10)	Anterior: ATT antes del MAPt. (Lo normal es que la aeronave no vire antes del MAPt aun cuando se encuentre bien por encima de la altitud requerida. Es necesaria una nota al respecto en la IAC). Posterior: El punto en que la superficie, comenzando en el SOC, alcanza la altitud requerida, a una gradiente de ascenso de 2,5% a menos que diga otra cosa + tiempo de reacción del piloto + retardo de ángulo de inclinación lateral.
Viraje en el MAPt (Figuras III-2-2-11 y III-2-2-12)	Anterior: ATT antes del MAPt. Posterior: SOC + tiempo de reacción del piloto + retardo de ángulo de inclinación lateral.

Tabla 12.5: Situación punto anterior y posterior de viraje [41]

12.3.5.4 Construcción de la protección del viraje

Una vez determinados las diferentes partes relacionadas al viraje, se procede con la construcción del mismo. En la figura 12.3 se puede observar el procedimiento para la construcción de un viraje de 90°, como es el caso de los virajes realizados en este trabajo.

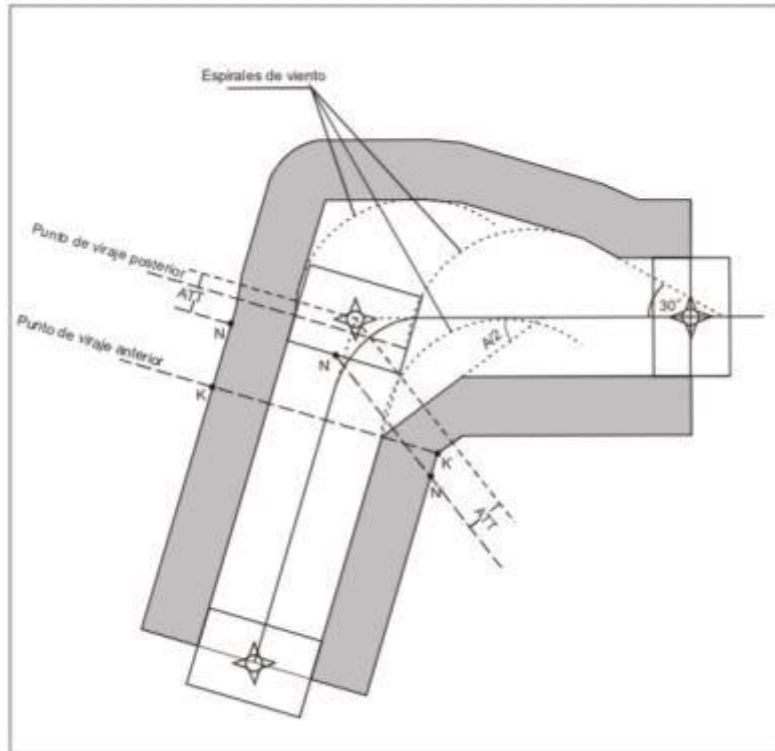


Figura 12.3: Protección de un viraje igual o menor de 90° con el método de espirales de viento [41]

Una vez desarrollado el proceso de protección de los tres virajes relativos al tramo de aproximación frustrada, se ha logrado observar que no existe ningún obstáculo que intersecte con las áreas definidas. Es por ello que se ha optado por realizar el método de protección simplificada, ya que ambos ofrecen la misma seguridad. Esto se observará en el capítulo siguiente.

12.3.6 Longitud mínima de un tramo limitado por dos puntos de recorrido

Cuando una aeronave se encuentra siguiendo su trayectoria y realiza un giro, este giro ha de estar protegido de la misma manera que cualquier tramo del trayecto. En este caso, con tales fines, se ha de establecer una distancia mínima de estabilización después del giro. Esta distancia constituye el tramo que va desde el punto de recorrido hasta el punto en el cual la aeronave se estabiliza dentro de su trayectoria nominal. Además, esta distancia cambiará dependiendo de si el punto consiste en un punto de paso o de sobrevuelo, diferenciándose en la forma de pasar por ellos, como se observa en la figura 12.4.

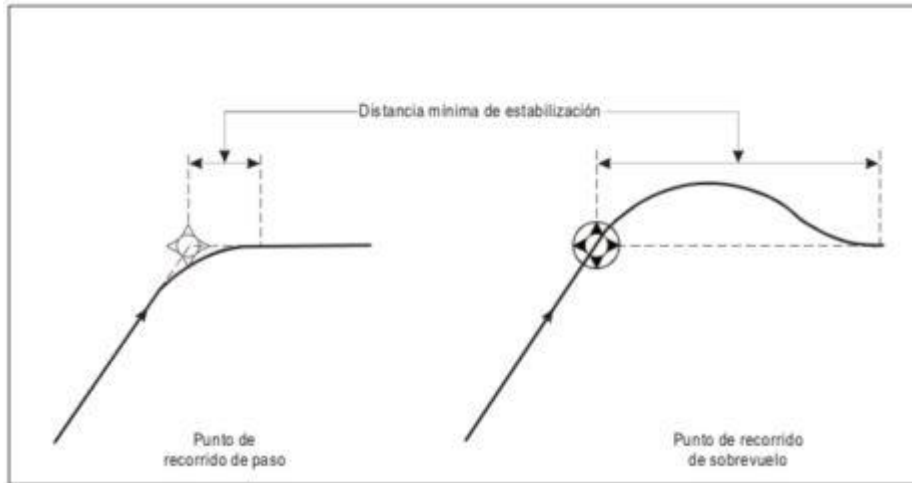


Figura 12.4: Puntos de paso y sobrevuelo [41]

Al igual que en pasos previos, el Doc. 8168 recoge la información necesaria para obtener los valores de esta distancia mínima sin tener que recurrir a estudios y cálculos complejos. Estos valores están recogidos en tablas dispuestas en función de la velocidad verdadera y del cambio de derrota de la aeronave. Además, cada una de las tablas hace referencia a un ángulo de inclinación lateral. En esta ocasión, al tratarse de una aproximación, los ángulos que interesan son los ángulos de 15° y 25°, tanto para puntos de paso como para puntos de sobrevuelo.

A continuación, se pueden observar las distintas tablas que ofrecen la información detallada.

Tabla III-2-1-1. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades del SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

Cambio de curso* (grados)	Velocidad verdadera (km/h)															
	< 0 =	240	260	280	300	320	340	360	380	400	440	480	520	560	600	640
50	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	3,8	4,4	5,1	5,8	6,5
55	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,6	4,2	4,9	5,6	6,3	7,2	
60	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,9	4,6	5,3	6,1	6,9	7,8	
65	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	2,6	2,9	3,2	3,5	4,2	5,0	5,8	6,6	7,6	8,6	
70	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8	4,6	5,4	6,3	7,2	8,2	9,3	
75	1,6	1,9	2,2	2,4	2,8	3,1	3,4	3,8	4,2	5,0	5,9	6,8	7,8	8,9	10,1	
80	1,8	2,0	2,3	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,5	5,4	6,3	7,4	8,5	9,7	11,0	
85	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,9	5,8	6,9	8,0	9,2	10,5	11,9	
90	2,0	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,8	5,3	6,3	7,4	8,7	10,0	11,4	12,9	
95	2,2	2,5	2,9	3,3	3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,8	8,1	9,4	10,8	12,4	14,0	
100	2,3	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	5,0	5,6	6,2	7,4	8,7	10,2	11,8	13,4	15,2	
105	2,5	2,9	3,4	3,9	4,4	4,9	5,5	6,1	6,7	8,0	9,5	11,1	12,8	14,6	16,6	
110	2,7	3,2	3,7	4,2	4,7	5,3	5,9	6,6	7,3	8,7	10,3	12,1	13,9	15,9	18,1	
115	3,0	3,5	4,0	4,6	5,2	5,8	6,5	7,2	7,9	9,5	11,3	13,2	15,2	17,4	19,8	
120	3,3	3,8	4,4	5,0	5,7	6,4	7,1	7,9	8,7	10,5	12,4	14,5	16,7	19,1	21,7	

* Utilícese el valor de 50° para cambios de curso inferiores a 50°.

Tabla 12.6: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de paso, 15 ° de inclinación [41]

Tabla III-2-1-1. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades del SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

Cambio de curso* (grados)	< α =	Velocidad verdadera (km/h)													
		240	260	280	300	320	340	360	380	400	440	480	520	560	600
50	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,3	3,8	4,4	5,1	5,8	6,5
55	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,6	4,2	4,9	5,6	6,3	7,2
60	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,9	4,6	5,3	6,1	6,9	7,8
65	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	2,6	2,9	3,2	3,5	4,2	5,0	5,8	6,6	7,6	8,6
70	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8	4,6	5,4	6,3	7,2	8,2	9,3
75	1,6	1,9	2,2	2,4	2,8	3,1	3,4	3,8	4,2	5,0	5,9	6,8	7,8	8,9	10,1
80	1,8	2,0	2,3	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,5	5,4	6,3	7,4	8,5	9,7	11,0
85	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,9	5,8	6,9	8,0	9,2	10,5	11,9
90	2,0	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,8	5,3	6,3	7,4	8,7	10,0	11,4	12,9
95	2,2	2,5	2,9	3,3	3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,8	8,1	9,4	10,8	12,4	14,0
100	2,3	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	5,0	5,6	6,2	7,4	8,7	10,2	11,8	13,4	15,2
105	2,5	2,9	3,4	3,9	4,4	4,9	5,5	6,1	6,7	8,0	9,5	11,1	12,8	14,6	16,6
110	2,7	3,2	3,7	4,2	4,7	5,3	5,9	6,6	7,3	8,7	10,3	12,1	13,9	15,9	18,1
115	3,0	3,5	4,0	4,6	5,2	5,8	6,5	7,2	7,9	9,5	11,3	13,2	15,2	17,4	19,8
120	3,3	3,8	4,4	5,0	5,7	6,4	7,1	7,9	8,7	10,5	12,4	14,5	16,7	19,1	21,7

* Utilícese el valor de 50° para cambios de curso inferiores a 50°.

Tabla 12.7: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de paso, 25 ° de inclinación [41]

Tabla III-2-1-4. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de sobrevuelo (unidades del SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

Cambio de curso* (grados)	< α =	Velocidad verdadera (km/h)													
		240	260	280	300	320	340	360	380	400	440	480	520	560	600
50	3,9	4,5	5,2	5,9	6,7	7,5	8,3	9,2	10,1	12,1	14,3	16,7	19,2	22,0	24,9
55	4,2	4,9	5,6	6,4	7,2	8,0	9,0	9,9	10,9	13,1	15,5	18,1	20,8	23,8	27,0
60	4,5	5,2	6,0	6,8	7,7	8,6	9,6	10,7	11,8	14,1	16,7	19,4	22,4	25,6	29,1
65	4,8	5,6	6,4	7,3	8,2	9,2	10,3	11,4	12,6	15,1	17,9	20,8	24,0	27,5	31,1
70	5,1	5,9	6,8	7,7	8,8	9,8	11,0	12,1	13,4	16,1	19,0	22,2	25,6	29,3	33,2
75	5,4	6,3	7,2	8,2	9,3	10,4	11,6	12,9	14,2	17,1	20,2	23,6	27,2	31,1	35,3
80	5,7	6,6	7,6	8,6	9,8	11,0	12,2	13,6	15,0	18,0	21,3	24,9	28,7	32,9	37,3
85	5,9	6,9	7,9	9,1	10,2	11,5	12,8	14,3	15,7	18,9	22,4	26,2	30,2	34,6	39,2
90	6,2	7,2	8,3	9,5	10,7	12,0	13,4	14,9	16,5	19,8	23,4	27,4	31,6	36,2	41,1
95	6,4	7,5	8,6	9,9	11,2	12,5	14,0	15,5	17,2	20,6	24,4	28,6	33,0	37,8	42,9
100	6,7	7,8	9,0	10,2	11,6	13,0	14,5	16,1	17,8	21,4	25,4	29,7	34,3	39,2	44,5
105	6,9	8,0	9,3	10,6	12,0	13,4	15,0	16,7	18,4	22,2	26,2	30,7	35,5	40,6	46,1
110	7,1	8,3	9,5	10,9	12,3	13,8	15,5	17,2	19,0	22,8	27,0	31,6	36,6	41,8	47,5
115	7,3	8,5	9,8	11,2	12,6	14,2	15,9	17,6	19,5	23,4	27,8	32,5	37,5	43,0	48,8
120	7,4	8,7	10,0	11,4	12,9	14,5	16,2	18,0	19,9	24,0	28,4	33,2	38,4	44,0	49,9

* Utilícese el valor de 50° para cambios de curso inferiores a 50°.

Tabla 12.8: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de sobrevuelo, 15 ° de inclinación [41]

Tabla III-2-1-4. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de sobrevuelo (unidades del SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

Cambio de curso* (grados)	Velocidad verdadera (km/h)															
	< 0 =	240	260	280	300	320	340	360	380	400	440	480	520	560	600	640
50	3,9	4,5	5,2	5,9	6,7	7,5	8,3	9,2	10,1	12,1	14,3	16,7	19,2	22,0	24,9	
55	4,2	4,9	5,6	6,4	7,2	8,0	9,0	9,9	10,9	13,1	15,5	18,1	20,8	23,8	27,0	
60	4,5	5,2	6,0	6,8	7,7	8,6	9,6	10,7	11,8	14,1	16,7	19,4	22,4	25,6	29,1	
65	4,8	5,6	6,4	7,3	8,2	9,2	10,3	11,4	12,6	15,1	17,9	20,8	24,0	27,5	31,1	
70	5,1	5,9	6,8	7,7	8,8	9,8	11,0	12,1	13,4	16,1	19,0	22,2	25,6	29,3	33,2	
75	5,4	6,3	7,2	8,2	9,3	10,4	11,6	12,9	14,2	17,1	20,2	23,6	27,2	31,1	35,3	
80	5,7	6,6	7,6	8,6	9,8	11,0	12,2	13,6	15,0	18,0	21,3	24,9	28,7	32,9	37,3	
85	5,9	6,9	7,9	9,1	10,2	11,5	12,8	14,3	15,7	18,9	22,4	26,2	30,2	34,6	39,2	
90	6,2	7,2	8,3	9,5	10,7	12,0	13,4	14,9	16,5	19,8	23,4	27,4	31,6	36,2	41,1	
95	6,4	7,5	8,6	9,9	11,2	12,5	14,0	15,5	17,2	20,6	24,4	28,6	33,0	37,8	42,9	
100	6,7	7,8	9,0	10,2	11,6	13,0	14,5	16,1	17,8	21,4	25,4	29,7	34,3	39,2	44,5	
105	6,9	8,0	9,3	10,6	12,0	13,4	15,0	16,7	18,4	22,2	26,2	30,7	35,5	40,6	46,1	
110	7,1	8,3	9,5	10,9	12,3	13,8	15,5	17,2	19,0	22,8	27,0	31,6	36,6	41,8	47,5	
115	7,3	8,5	9,8	11,2	12,6	14,2	15,9	17,6	19,5	23,4	27,8	32,5	37,5	43,0	48,8	
120	7,4	8,7	10,0	11,4	12,9	14,5	16,2	18,0	19,9	24,0	28,4	33,2	38,4	44,0	49,9	

* Utilícese el valor de 50° para cambios de curso inferiores a 50°.

Tabla 2.9: Valores mínimos de estabilización, punto recorrido de sobrevuelo, 25 ° de inclinación [41]

Como se explicará más adelante, el diseño de todos los tramos de la aproximación ha seguido el formato de ofrecer una longitud de sobra con el fin de garantizar una mayor protección.

12.4 Circuito de espera

Previo a la propia aproximación, se encuentra el circuito de espera asociada al punto que da comienzo a la aproximación, el IAF. Este circuito tiene como fin ofrecer la posibilidad de descongestionar el tráfico aéreo haciendo que las aeronaves retrasen su llegada orbitando en este circuito [41].

Hay varios tipos de circuitos de espera dependiendo de la situación del IAF y los tramos posteriores relacionados con él. En este caso, el circuito se configura como un circuito con giros a derecha, de tal manera que tras el primer giro a derecha se pasa a la derrota de alejamiento y, tras un cierto tiempo, otro giro a derechas sitúa a la aeronave dentro de la derrota de acercamiento. Este proceso se ha de continuar hasta el momento en el que el controlador de la zona proporcione autorización al piloto para proceder con la operación.

Asimismo, el circuito de espera viene determinado por la velocidad de referencia, que se trata de la velocidad indicada sobre la que ha de transitar el circuito. Esta velocidad se escoge haciendo uso del Doc. 8168 de la OACI, donde se detallan las velocidades a usar en función de la altitud deseada del circuito. A continuación, se puede observar la tabla que proporciona estos valores:

Niveles ¹	Condiciones normales	Condiciones de turbulencia
Helicópteros hasta 1 830 m (6 000 ft) inclusive	185 km/h (100 kt)	
Hasta 4 250 m (14 000 ft) inclusive	425 km/h (230 kt) ² 315 km/h (170 kt) ⁴	520 km/h (280 kt) ³ 315 km/h (170 kt) ⁴
Más de 4 250 m (14 000 ft) hasta 6 100 m (20 000 ft) inclusive Más de 6 100 m (20 000 ft) hasta 10 350 m (34 000 ft) inclusive	445 km/h (240 kt) ⁵ 490 km/h (265 kt) ⁵	520 km/h (280 kt) o 0,8 Mach, lo que sea menor ³
Más de 10 350 m (34 000 ft)	0,83 Mach	0,83 Mach

1. Los niveles de esta tabla representan *altitudes* o los correspondientes *niveles de vuelo*, dependiendo del reglaje de altímetro utilizado.
 2. Cuando al procedimiento de espera le sigue el tramo inicial de un procedimiento de aproximación por instrumentos promulgado para una velocidad superior a 425 km/h (230 kt), también deberá promulgarse la espera a esta velocidad superior, siempre que sea posible.
 3. Véase 1.3.1.4, "Aeronaves en espera a 520 km/h (280 kt)/0,8 Mach".
 4. Solamente para esperas de aeronaves Cat A y B, y Cat H por encima de 1 830 m (6 000 ft).
 5. Siempre que sea posible, para procedimientos de espera asociados con estructuras de aerovías deberá utilizarse una velocidad de 520 km/h (280 kt).

Tabla 12.10: Velocidades asociadas al circuito de espera [41]

Por otra parte, otra característica fundamental de los circuitos de espera es su cronometraje de alejamiento, que determinará la distancia a la que ha de llegar la aeronave hasta volver a virar y entrar en la derrota de acercamiento de nuevo. Existen dos posibles cronometrages de alejamiento:

- 1 minuto: altitud menor o igual a 4250 metros.
- 1.5 minutos: altitud mayor de 4250 metros.

Para este proyecto, la altitud del circuito de espera es inferior a los 4250 metros que marcan el límite, por lo que el cronometraje para el tramo de alejamiento será de un minuto.

Finalmente, otro factor a tener en cuenta es la velocidad angular del viraje, que viene determinada por el ángulo de inclinación lateral. En este caso, siguiendo las directrices del Doc. 8168 de la OACI, el ángulo de inclinación lateral de referencia será 25°. De esta forma, con este dato se puede obtener la velocidad angular del viraje mediante la tabla de la figura 12.5 o haciendo uso de su respectiva fórmula, que se explicará a continuación.

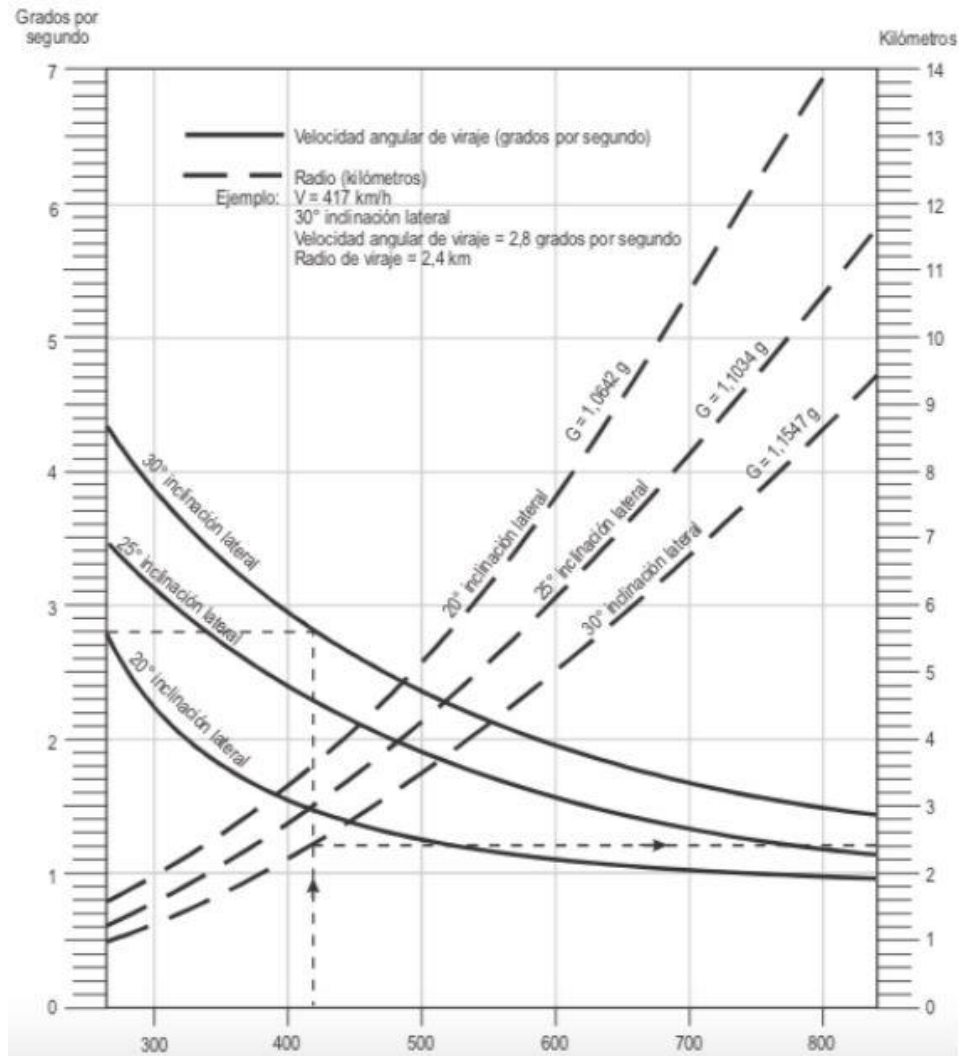


Figura 12.5: Relación entre la inclinación lateral, el radio de viraje y la velocidad para el circuito de espera [41]

A la hora de diseñar de manera precisa el área relativa al circuito de espera, no basta con los parámetros básicos ya explicados, se requiere del conocimiento de todas las medidas que se explican a continuación:

- Altitud del circuito de espera (H).
- Ángulo de inclinación lateral (α).
- Tolerancia técnica de vuelo: ofrece los valores de tolerancia para diferentes ámbitos del circuito, como son: 10 segundos en el cronometraje de alejamiento o 5° en la precisión del rumbo.
- Tiempo de cronometraje (t).
- Longitud del tramo de alejamiento (L): obtenida de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1000TAS \cdot t}{3600}$$

Con "TAS" en kilómetros por hora, "t" en minutos y L en kilómetros.

- Velocidad angular del viraje (R): obtenida de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{6355 \cdot \tan \alpha}{\pi TAS}$$

Con "α" en grados, "TAS" en kilómetros por hora y "R" en grados por segundo.

- Radio de viraje (r): obtenido de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{0,18 \cdot TAS}{\pi R}$$

Con "TAS" en metros por segundo, "R" en grados por segundo y "r" en kilómetros.

- Velocidad del viento (w): obtenida de la siguiente ecuación:

$$w = 12h + 87$$

Con "h" siendo la altitud en miles de metros y "w" en kilómetros por hora.

El uso de estas ecuaciones es de vital importancia en el momento de construcción de las áreas de protección del circuito de espera.

Posteriormente al cálculo de cada una de las medidas previamente mencionadas, se pasará a la construcción del área de franqueamiento de obstáculos relativa al circuito de espera. En esta ocasión, es posible utilizar el método simplificado basado en un rectángulo, como ofrece el Doc. 8168 de la OACI. Este método consiste, de manera poco detallada, en elaborar un rectángulo entorno al IAF como área primaria siguiendo el esquema ofrecido en la figura 12.6. Y como complemento a esta área, el área secundaria se comprenderá como una extensión al rectángulo con una longitud de 5 millas náuticas adicionales.

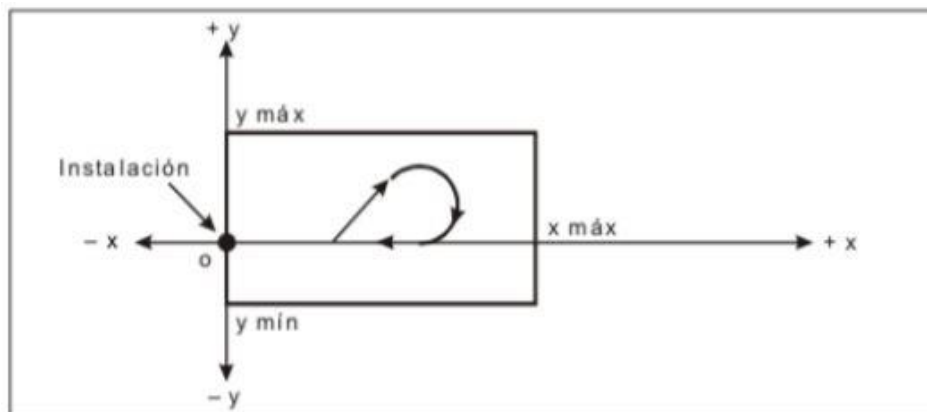


Figura 12.6: Área primaria del circuito de espera [41]

Como paso final en la construcción de las áreas, se ha de detallar la posición de cada uno de los 4 vértices que conforman el rectángulo equivalente al área primaria de protección. Esto se consigue empleando un sistema de coordenadas cuyo origen es el IAF y la dirección x negativa coincide con la derrota de acercamiento y la dirección positiva referentes al eje y se encuentran en la parte que contiene la mayor parte del circuito de espera.

Una vez expuesto el sistema de coordenadas, la obtención de los vértices resulta de la aplicación de las 4 fórmulas siguientes:

$$x_{max} = TAS \cdot (0,0167t + 0,0297) + W \cdot (0,0167t + 0,0381) - 1,67$$

$$x_{min} = TAS(-0,0241) + W(-0,037) + 2,04$$

$$y_{max} = TAS(0,0012t + 0,0266) + W(0,0158t + 0,0368) + 0,843t - 5,37$$

$$y_{min} = TAS(-0,0015t - 0,0202) + W(-0,0167t - 0,027) + 1,3$$

En las cuales la variable "W" expresa la velocidad del viento en kilómetros por hora, y la "t" es igual a 1, el valor del cronometraje de alejamiento en minutos.

Eventualmente, tras haber determinado las áreas de protección relativas al circuito de espera, solo queda obtener los márgenes de franqueamiento de obstáculos de cada parte del área.

Pues bien, de acuerdo con el Doc. 8168 de la OACI, el área primaria tendrá asociado un margen de 300 metros, y el área secundaria se dividirá en 5 escalones de una milla náutica de longitud cada uno de ellos en los cuales se irá reduciendo su margen hasta llegar a cero en el límite exterior del área secundaria, tal y como recoge la tabla 12.11.

<i>Distancia más allá del límite del área de espera</i>		<i>Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos por encima de terreno bajo y llano</i>	
<i>Kilómetros</i>	<i>Millas marinas</i>	<i>Metros</i>	<i>Pies</i>
0 a 1,9	0 a 1,0	300	984
1,9 a 3,7	1,0 a 2,0	150	492
3,7 a 5,6	2,0 a 3,0	120	394
5,6 a 7,4	3,0 a 4,0	90	294
7,4 a 9,3	4,0 a 5,0	60	197
Categoría H			
0 a 3,7	0 a 2,0	lineal	lineal
		300 a 0	984 a 0

Tabla 12.11: Márgenes de franqueamiento de obstáculos en el área de espera [41]

12.5 Tramo de aproximación inicial

Este es el tramo que va desde el IAF hasta el IF, donde la aproximación pasa a su tramo intermedio. Durante esta parte de la aproximación el objetivo principal es la reducción de altitud con el fin de encarar el aterrizaje [41].

Al igual que en apartados anteriores, para determinar las medidas y forma de este tramo de la aproximación se ha de consultar el Doc. 8168 de las OACI en el cual se ofrecen expuestas las diferentes características relativas a la aproximación inicial. En primer lugar, el documento establece que la altitud de este tramo nunca puede ser menos que la altitud de los tramos posteriores intermedio y final. Además, las variaciones de altitud no pueden superar los 50 metros bajo ningún concepto.

Por otra parte, la longitud óptima para el tramo de aproximación inicial es de 9 kilómetros, lo cual deja como opción cualquier medida con la cual se pueda ofrecer una longitud suficiente como para reducir la altura necesaria.

En cuanto a la pendiente de esta parte de la aproximación, su valor ideal es del 4%. Sin embargo, el máximo puede ser del 8% si hubiese la necesidad de un descenso más pronunciado; o de 13.2%, en el caso de una velocidad restringida a 165 kilómetros por hora.

Finalmente, las áreas de franqueamiento, divididas en área primaria y secundaria, seguirán los márgenes establecidos previamente en este capítulo y su semianchura será de 2.5 millas náuticas a cada uno de los lados del eje. En la figura 12.7 se puede observar el esquema horizontal de estas áreas.

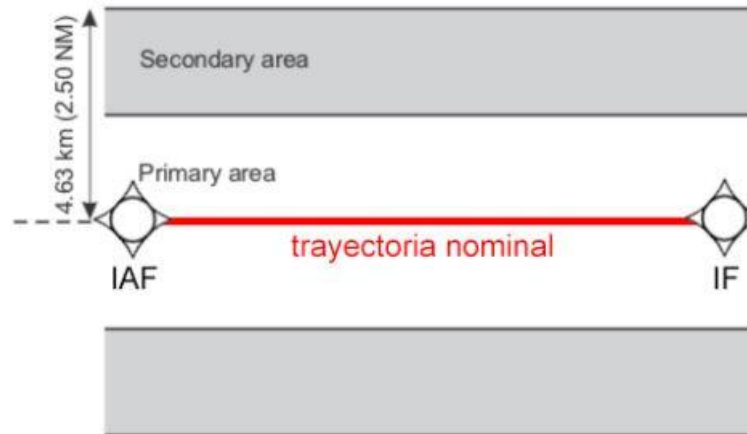


Figura 12.7: Áreas primaria y secundaria del tramo inicial de la aproximación [41]

12.6 Tramo de aproximación intermedia

Este segundo tramo de la aproximación tiene comienzo en el IF y termina en el FAP, donde la aproximación pasa a su parte final. Este tramo sirve como unión entre el tramo inicial y final, de manera que, una vez llegados al IF, la aeronave reduce su velocidad manteniendo una altitud casi constante para posicionarse de manera precisa y realizar la aproximación final con toda la precisión posible [41].

Las características que definen el tramo de aproximación intermedia son, en primer lugar, que su longitud ha de estar contenida entre los 9.3 y los 28 kilómetros, siendo la longitud óptima los 19 kilómetros.

Por otra parte, en cuanto a la pendiente se refiere, se recomienda que la pendiente sea nula o que, por lo menos, se disponga de una parte horizontal. Sin embargo, el máximo de pendiente permitida se sitúa en el 5.2%, o el 13.2% en casos con restricciones de velocidad de 165 kilómetros por hora.

Un punto a remarcar es el hecho de que, a una distancia de dos millas náuticas del FAP, se ha de realizar el cambio al sistema SBAS, ya que se trata de una aproximación con este tipo de ayuda.

Finalmente, concentrándose en las áreas de franqueamiento de obstáculos, se recuerda que se seguirán los márgenes determinados en el apartado relacionado con las protecciones, tal y como se detalla en él. En la figura 12.8 se pueden observar las medidas y formas de las áreas de protección asociadas al tramo de aproximación intermedia.

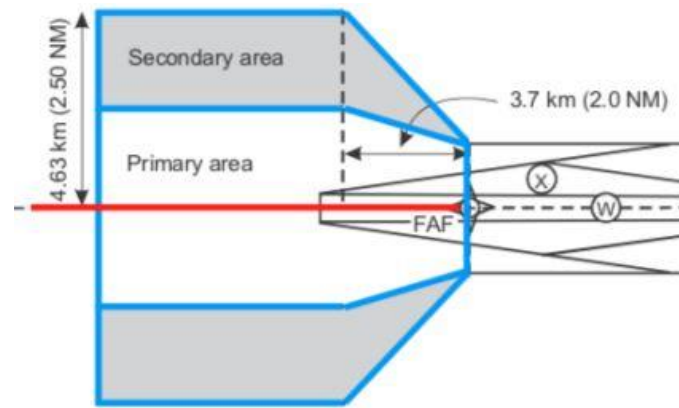


Figura 12.8: Áreas primaria y secundaria del tramo intermedio de la aproximación [41]

12.7 Tramo de aproximación final

Este tramo de la aproximación tiene comienzo en el FAF y puede concluir de 2 maneras: o bien aterriza de manera correcta en la pista deseada, o bien comienza el tramo de aproximación frustrada en el punto reservado para tal fin. En el caso de este proyecto, la aproximación es SBAS LPV-200, que ha de disponer de las mismas características que una ILS CAT I, siendo un tramo de precisión y estando su altura de decisión a una altitud de 200 pies [41].

Las características que configuran este tramo son las propias de una aproximación de precisión. En primer lugar, la longitud óptima del tramo será 9.3 kilómetros, teniendo el mínimo en 5.6 kilómetros.

Por otra parte, en cuanto a la pendiente se refiere, se deberá seguir una pendiente que esté entre los 3° y los 3.5° , siendo la pendiente mínima igual al valor óptimo de inclinación.

La parte característica de este tramo es la forma de determinar los márgenes de franqueamiento de obstáculos. Tanto es así que, para este tipo de aproximación de precisión, se designan unas superficies nuevas determinadas OAS (Superficies de evaluación de obstáculos), a diferencia de los tramos anteriores de la aproximación, donde se empleaban las áreas primaria y secundaria.

12.7.1. Superficie de evaluación de obstáculos

Este conjunto de superficies que se disponen en las inmediaciones de la pista, están formados por 6 superficies diferentes. Se encuentran dispuestas de manera simétrica con respecto al eje de la pista y se denominan de la siguiente manera:

- 2 planos X. 1 a cada lado del eje de la pista.
- 2 planos Y. 1 a cada lado del eje de la pista.
- 1 plano W.

- 1 plano Z.

La ecuación que describe cada uno de estos planos sigue la forma normal de la ecuación de planos, como se ve en la fórmula 11.12. Las coordenadas del sistema vienen determinadas como se ve en la figura 12.9, indicando la dirección X positiva el sentido contrario al movimiento del avión, la dirección Y positiva el rumbo a derechas desde la dirección de aproximación, y la dirección Z positiva apunta hacia arriba de manera perpendicular. Además, el origen se encuentra ubicado en el umbral de la pista.

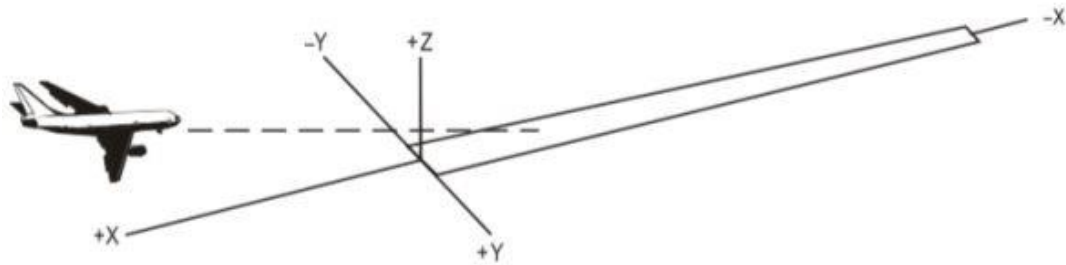


Figura 12.9: Sistema de referencia empleado por las OAS [41]

De tal modo, las OAS han de quedar posicionadas de una manera similar a la que se expone en la figura 12.10. Además, en la figura 12.11, se pueden observar estas superficies de manera gráfica haciendo uso de las vistas de frente, planta y perfil del conjunto de superficies.

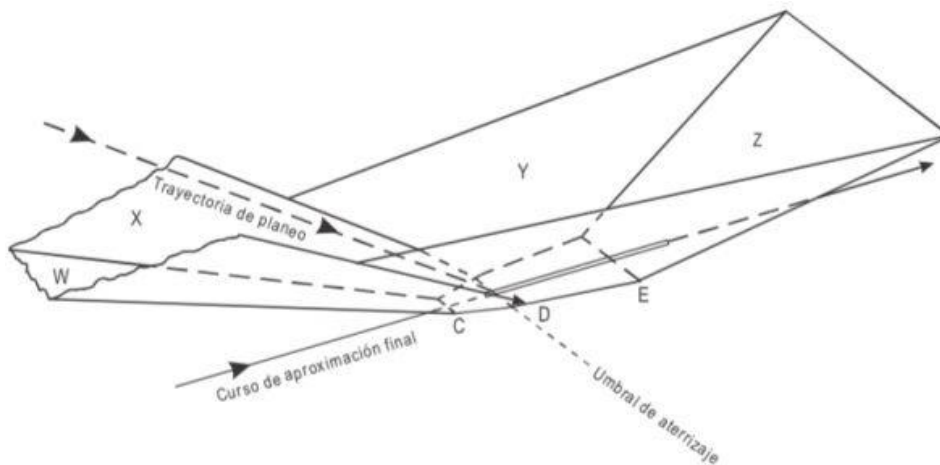


Figura 12.10: Vista en perspectiva de las OAS [41]

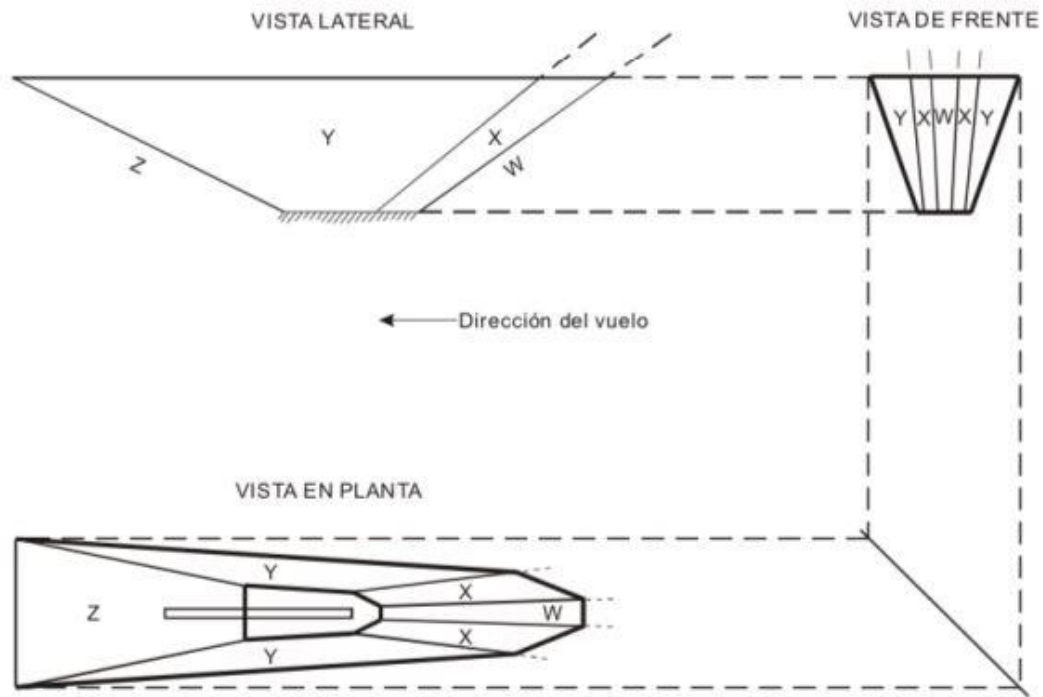


Figura 12.11: Vista frontal, lateral y en planta de las OAS [41]

Estas superficies, una vez diseñadas correctamente, ofrecerán los límites con los cuales se garantiza que no existirá ningún obstáculo que pueda importunar los tramos de aproximación final y el comienzo de la aproximación frustrada.

A la hora de diseñar las OAS, los factores de los que dependen son los siguientes:

- La distancia del localizador al umbral de la pista: Al usarse en esta ocasión el sistema SBAS, no existe localizador, por lo que se usa el GARP, que se encuentra a 305 metros del umbral de pista.
- Ángulo de la trayectoria de planeo: Entre 3 y 3.5°.
- Altura de referencia ILS-RDH: Se sigue la indicación del Doc. 8168 y se deja el valor por defecto, 15 metros.
- Categoría de operación ILS: CAT I, ya que equivale al SBAS LPV-200.
- Categoría de la aeronave: en este caso, la aeronave de referencia tiene categoría D.
- Pendiente de ascenso de aproximación frustrada: en esta ocasión es del 2.5%.

Se precisa en este punto explicar que es el GARP, y es que se trata de un punto ficticio que sirve a modo de localizador y se encuentra con una configuración tal y como se observa en la figura 12.12.

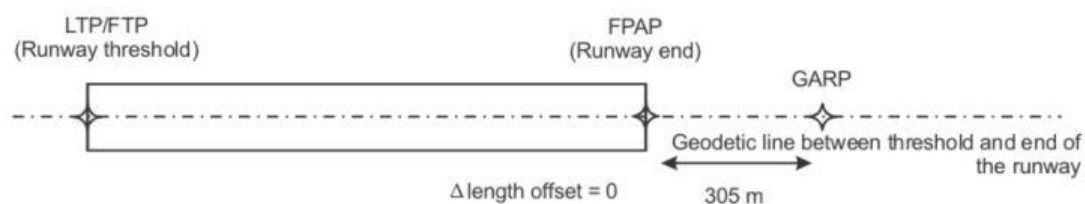


Figura 12.12: Ubicación del GARP con respecto a la pista [41]

Con estos datos, empleando la información que aparece en el Doc. 8168 de la OACI con la forma que se muestra en la tabla 12.12 y sabiendo que se utiliza baroaltímetro, se concluye que el valor que se emplea como margen de franqueamiento de obstáculos es 49 metros.

Categoría de aeronaves (V_{at})	Margen utilizando radioaltímetro		Margen utilizando baroaltímetro	
	Metros	Pies	Metros	Pies
A – 169 km/h (90 kt)	13	42	40	130
B – 223 km/h (120 kt)	18	59	43	142
C – 260 km/h (140 kt)	22	71	46	150
D – 306 km/h (165 kt)	26	85	49	161
H – 167 km/h (90 kt)	8	25	35	115

Nota 1.— La velocidad para Cat H es la velocidad máxima en aproximación final, no V_{at} .

Nota 2.— Para aeronaves de Cat E, consultar las ecuaciones de 1.4.8.8.3.4.

Tabla 12.123: Margen de pérdida de altura en función de la categoría de aeronave [41]

Continuando con el proceso, se han de determinar las constantes que definen cada uno de los planos. Con este fin, la OACI ha diseñado el *software* PANS-OPS, con el cual se pueden obtener estos valores con la simple introducción de las variables que se han estudiado previamente. Del mismo modo, esta aplicación también ofrece la posibilidad de estudiar de manera detallada cada uno de los obstáculos proporcionando como solución si se vulneran las superficies o, por el contrario, estas se encuentran en su estado final completo.

A continuación, se observa la interfaz del *software* PANS-OPS:

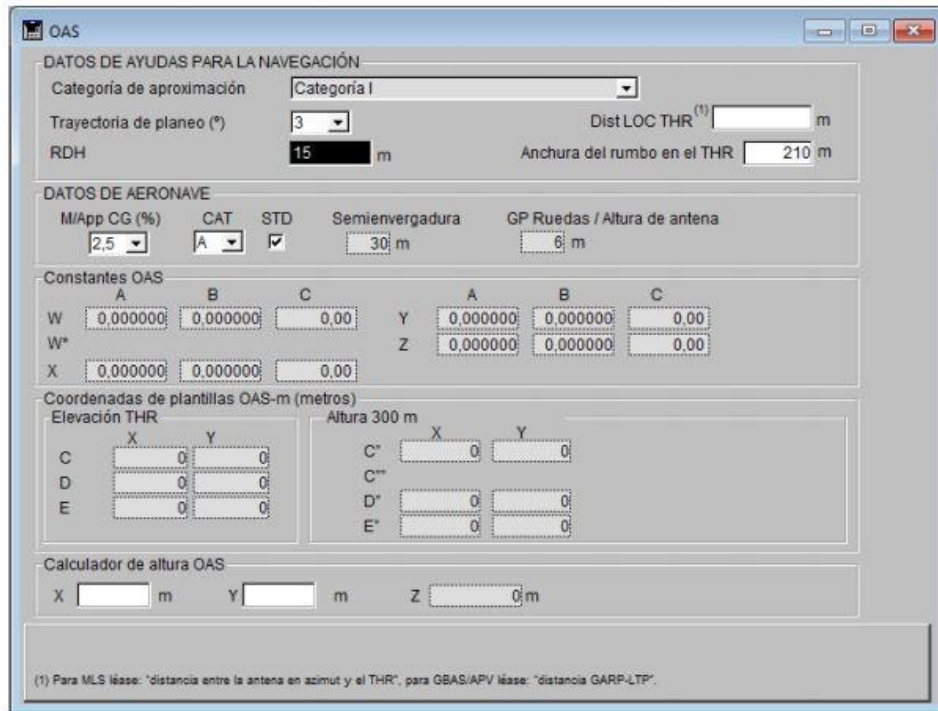


Figura 12.13: Interfaz del programa PANS-OPS [41]

12.8 Tramo de aproximación frustrada

Este último tramo de la aproximación tiene comienzo en el SOC (*Start of Climb*) y concluye o bien al llegar de nuevo al IAF con el fin de volver a intentar lograr la aproximación, o bien una vez se cambie el rumbo pasando a tener como destinación otro aeródromo [41].

Este tramo se divide en dos partes, el tramo de precisión, que comienza en el SOC, que se encuentra a una altitud igual a la de franqueamiento de obstáculos determinada por las OAS, en el punto que coincide con la paralela a la senda de planeo cuyo origen se sitúa a 900 metros detrás del umbral, y finaliza en el momento en el que la superficie Z llega a la altitud de 300 metros. Es en ese punto donde comienza el tramo de no precisión, que se alarga hasta el final del tramo de aproximación frustrada.

Por otra parte, el tramo de no precisión emplea de nuevo las áreas de protección primaria y secundaria, que, se compone al igual que anteriormente por un área primaria en primera instancia a 30 metros de margen, y más tarde a 50 metros, una vez entrada en el tramo final de frustrada, y cuya área secundaria disminuye su grosor hasta los 0 metros de margen de manera lineal. Asimismo, del mismo modo que en otras partes de la aproximación, la anchura del área es de 2 millas náuticas.

Finalmente, como característica fundamental, la pendiente óptima de diseño del tramo de frustrada es del 2.5%.

Capítulo 13

Construcción de la aproximación para la pista 21R

Se llega de esta forma al proceso de construcción de la aproximación de estudio de este trabajo, una vez detalladas las características tanto del aeropuerto, como de la aeronave de referencia, como de la propia aproximación.

Este capítulo trata de exponer de manera detallada los valores y resultados finales que se obtienen tras realizar el proceso de diseño, sin centrarse en el método de llegar a estos resultados, ya que esta tarea se ha realizado en el capítulo anterior.

13.1 Circuito de espera

La característica principal que define un circuito de espera es la altitud a la que este se encuentra. En esta ocasión el circuito se diseña para una altitud de 1829 metros, dato que será de gran utilidad a la hora de obtener el resto de parámetros:

- Temperatura: ISA + 15°C.
- Velocidad indicada: 425 kilómetros por hora.
- Velocidad verdadera: 470 kilómetros por hora.
- Velocidad del viento: 123.6 kilómetros por hora.
- Cronometraje del viento: 1 minuto.
- Velocidad del viraje: 2.01 °/s.
- Radio del viraje: 3.73 kilómetros.
- Longitud del tramo de alejamiento: 7.83 kilómetros.

De esta forma, haciendo uso de estos datos es perfectamente posible diseñar el circuito de espera, que se expondrá más adelante de forma conjunta con el resto de la aproximación.

13.2 Aproximación inicial

El primer punto notable de este tramo es el hecho de que el IAF se establece como un punto de paso, de manera que no es necesario pasar estrictamente por tal punto, facilitando así la capacidad de maniobra de la aeronave y su estabilización. Además, en este punto de referencia será obligatoria la notificación al centro de control aéreo. Las características propias de este tramo se exponen a continuación:

- Longitud: 26.55 kilómetros.

- Pendiente: 4.06%
- Altitud IAF: 1829 metros
- Altitud IF: 751.94 metros

13.3 Aproximación intermedia

De la misma manera que el punto de referencia IAF, el punto de referencia IF se establece como un punto de paso, facilitando así que, en caso de que se requiera el paso por este punto sin un paso previo por el IAF debido a condiciones extraordinarias, se facilite la entrada y estabilización dentro del tramo de aproximación intermedia. Sin embargo, este punto de referencia no requiere de la notificación expresa a las autoridades aeroportuarias. A continuación, se exponen los parámetros referidos a dicho tramo:

- Longitud: 10 kilómetros.
- Pendiente: 1.83%.
- Altitud IF: 751.94 metros.
- Altitud FAP: 569.06 metros

13.4 Aproximación final

De nuevo, el punto que da comienzo a este tramo, el FAP, será considerado como punto de paso y será obligatoria la notificación al centro de control a su paso por el punto. Asimismo, los valores referentes al tramo de aproximación final se detallan a continuación:

- Longitud: 10.37 kilómetros.
- Pendiente: 5.4%, que equivale a 3.1°.
- Altitud FAP: 569.06 metros.
- Altitud umbral: 9 metros.

Sin embargo, al tratarse este tramo de un tramo de precisión, se requieren de los cálculos adicionales relativos a las superficies de evaluación de obstáculos.

13.4.1 Superficies de evaluación de obstáculos

El fin último de este apartado consiste en obtener las ecuaciones de cada uno de los planos que componen las OAS. Para ello, se emplea el *software* PANS-OPS, al cual hay que introducirle los siguientes parámetros:

- Categoría de aproximación: APV II, que a efectos prácticos constituye lo mismo que la categoría LPV-200 y facilita el proceso.
- Ángulo de senda de planeo: 3.1°.

- Distancia del localizador al umbral (en este caso al GARP): 2355 metros.
- Altura de referencia: 15 metros.
- Anchura de rumbo en el umbral: 210 metros, dado por defecto.
- Pendiente de aproximación frustrada: 2.5%.
- Categoría de la aeronave: categoría D.

Finalmente, una vez accionado el programa se obtienen los vértices que definirán el conjunto de planos que se establecerá entorno a la pista, que son los expuestos en la tabla 12.13.

<i>Coordenadas vértices</i>	C	D	E	C''	D''	E''
x (m)	225	-114	-1030	9288	4790	-7771
y (m)	109	161	274	193	878	1852
z (m)	-	-	-	300	300	168

Tabla 13.1: Coordenadas de los vértices de las OAS

Tras obtener estos puntos, se puede proceder a elaborar las superficies de las OAS, como se observará en el apartado de la representación de las protecciones asociadas a cada tramo.

13.4.2 Determinación de la altitud / altura de franqueamiento de obstáculos

Una vez definidas las OAS, al igual que con cada una de las protecciones de la aproximación, se han de examinar los obstáculos existentes en cada zona y su posible vulneración. Se hace especial hincapié en este evento durante este apartado por el hecho de ser esta la única protección en la cual existe algún obstáculo que la vulnere.

Los obstáculos se obtienen fácilmente de la *web* del AIP de ENAIRE, una vez buscado el prefijo GCLP referente al aeropuerto de estudio, el documento a descargar en formato ".xlsx", ejecutable con Microsoft Excel, es el denominado como "Ítem 10: Obstáculos de aeródromo".

De esta forma, y siguiendo un cuidadoso procedimiento se evalúan cada uno de los obstáculos para determinar cuál es el mayor de ellos y aplicar un margen en función de tal obstáculo.

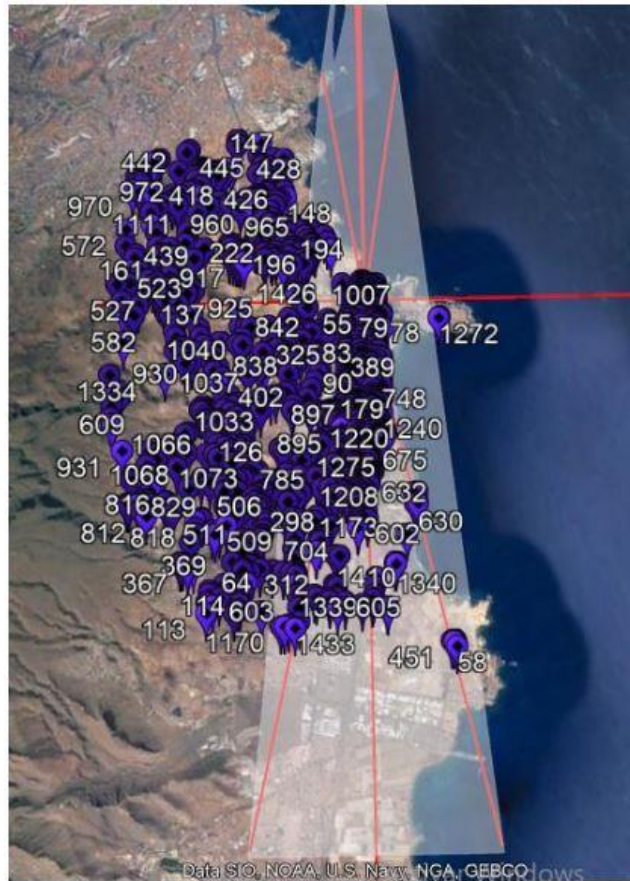


Figura 13.1: Evaluación de los obstáculos en las superficies OAS

En este caso, el obstáculo mayor resulta vulnerar la superficie por 30 metros, por lo que el margen de franqueamiento de obstáculos se ha de configurar 30 metros por encima de su configuración inicial.

13.5 Aproximación frustrada

En el caso de la aproximación frustrada, esta se puede dividir en 4 tramos diferenciados, cada uno de ellos con una dirección y unidos entre sí por virajes a izquierdas de 90° cada uno. En cada tramo se seguirá una trayectoria con características diferentes que serán determinadas por el entorno del tramo.

- El primer tramo va desde el SOC hasta el punto de viraje número 1, punto de paso sin obligación de aviso al control aéreo. Este tramo dispone de una longitud de 32.11 kilómetros y una pendiente del 2.5%, situando así al punto de viraje número 1 a una altitud de 1179.21 metros.
- El segundo tramo tiene una longitud de 36.11 kilómetros y con trayectoria horizontal, es decir, con pendiente igual al 0%. Esto hace que la altitud del punto de viraje número 2, punto de paso con notificación no obligatoria, sea de 1179.21 metros.

- El tercer tramo cuenta con una longitud de 73.13 kilómetros y una pendiente de 0.89%. Esto resulta en que el punto de viraje número 3, punto de paso con notificación no obligatoria, se sitúe a una altitud de 1829 metros.
- Finalmente, el cuarto tramo es horizontal y tiene una longitud de 36.11 kilómetros, concluyendo de esta manera en el IAF inicial.

13.6 Representación del trayecto nominal de la ruta

Se pasa ahora a representar la trayectoria que describe la aproximación haciendo uso de la aplicación Google Earth. Además, cabe destacar que el *software* Matlab ha resultado de vital importancia a la hora de elaborar la aproximación en el entorno de Google Earth.

13.6.1 Tramos de aproximación inicial, intermedia y final.

En la figura siguiente, se puede visualizar el diseño final de la trayectoria nominal que sigue la aproximación, sin tener en cuenta el circuito de espera, que se mostrará más adelante.

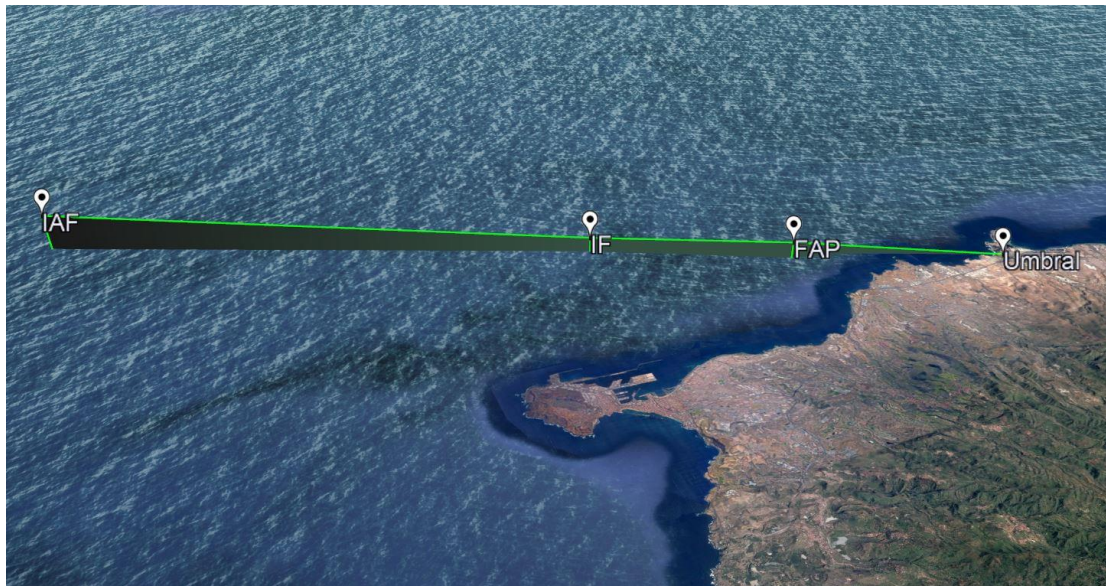


Figura 13.2: Tramo de aproximación inicial, intermedia y final

Siguiendo con la representación de la aproximación, se puede observar en la figura 13.3 el perfil de elevación que muestra la aproximación.



Figura 13.3: Perfil de elevación del tramo de aproximación inicial, intermedia y final

13.6.2 Tramo de aproximación frustrada

Se observa en la figura 13.4 la trayectoria del tramo de aproximación frustrada que seguiría la aeronave.

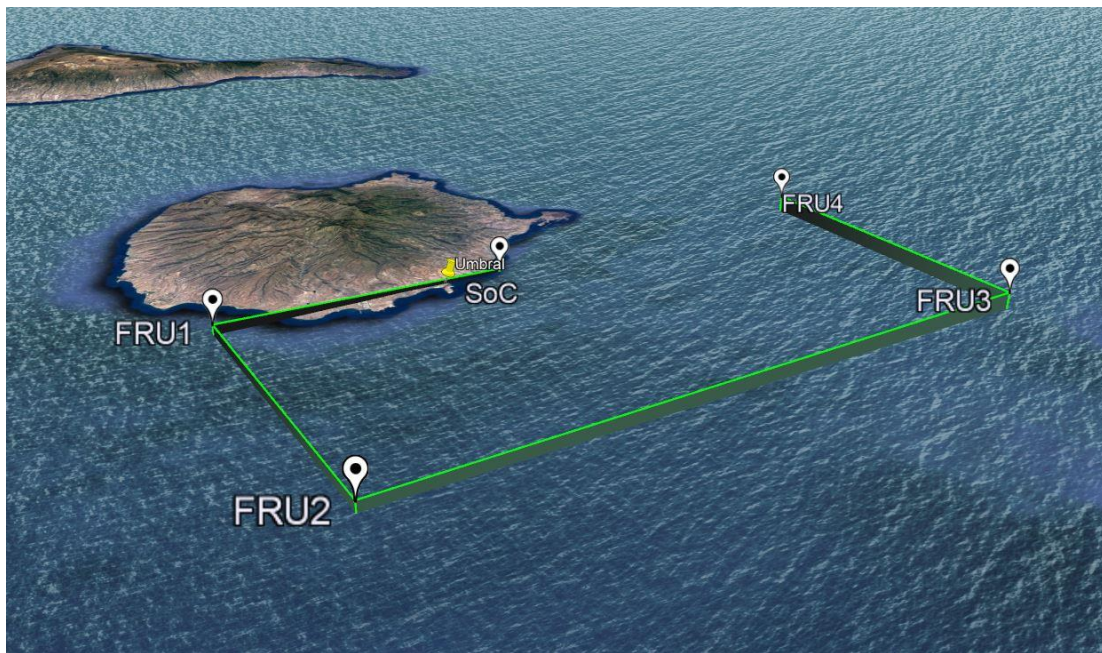


Figura 13.4: Tramo de aproximación frustrada

Y, de la misma forma, se puede observar el perfil de elevación correspondiente al tramo de aproximación frustrada.



Figura 13.5: Perfil de elevación del tramo de aproximación frustrada

13.6.3 Puntos de referencia de la ruta

Existen diferentes tipos de puntos de referencia y cada uno tiene un símbolo identificativo. Es por ello que resulta necesario exponer en la siguiente tabla los diferentes puntos de referencia junto con sus características.








Punto de referencia	Coordenadas	Altitud [m]	Tipo / notificación	Simbología
IAF	28°20'19.85"N 15°12'21.49"O	1829	Punto de paso / Obligatoria	
IF	28° 6'57.45"N 15°18'18.33"O	751.94	Punto de paso / No obligatoria	
FAP	28° 1'55.65"N 15°20'32.04"O	569.06	Punto de paso / Obligatoria	
Umbral	27°56'41.03"N 15°22'51.29"O	9	Punto de sobrevuelo / No obligatoria	
P1 frustrada	27°43'53.62"N 15°28'31.56"O	1179.21	Punto de paso / No obligatoria	
P2 frustrada	27°36'55.34"N 15° 7'58.41"O	1179.21	Punto de paso / No obligatoria	
P3 frustrada	28°13'45.20"N 14°52'14.88"O	1829	Punto de paso / No obligatoria	

Tabla 13.2: Puntos de referencia de la aproximación

13.6.4 Representación conjunta de la aproximación

Finalmente, se pueden unificar los tres anteriores apartados para dar lugar a una representación general de la aproximación.

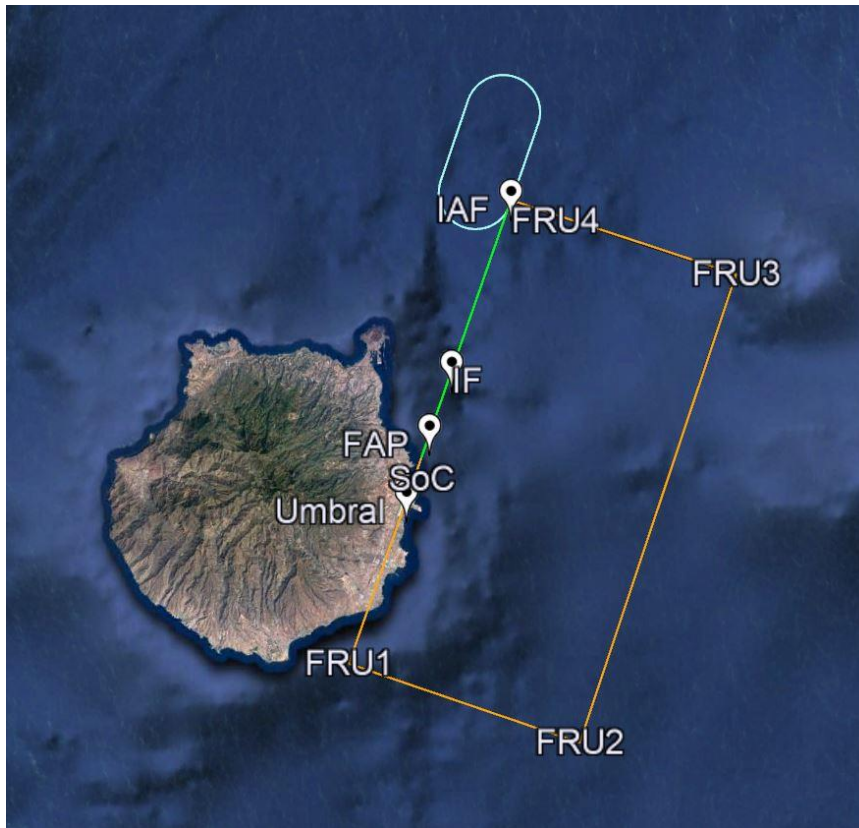


Figura 13.6: Representación de la aproximación completa

13.7 Superficies de franqueamiento de obstáculos

Al igual que en los apartados anteriores, en este caso los métodos a seguir, así como el procedimiento se han explicado en el capítulo anterior. Es por ello que en este punto únicamente se va a recordar los márgenes de franqueamiento de obstáculos, así como anotaciones remarcables respecto a la representación de las superficies de protección. Por lo tanto, las superficies quedan elaboradas de la siguiente manera:

- Protección para el circuito de espera: el margen dentro del área primaria es de 300 metros, mientras que en el área secundaria se reduce gradualmente hasta los 0 metros de su límite exterior.

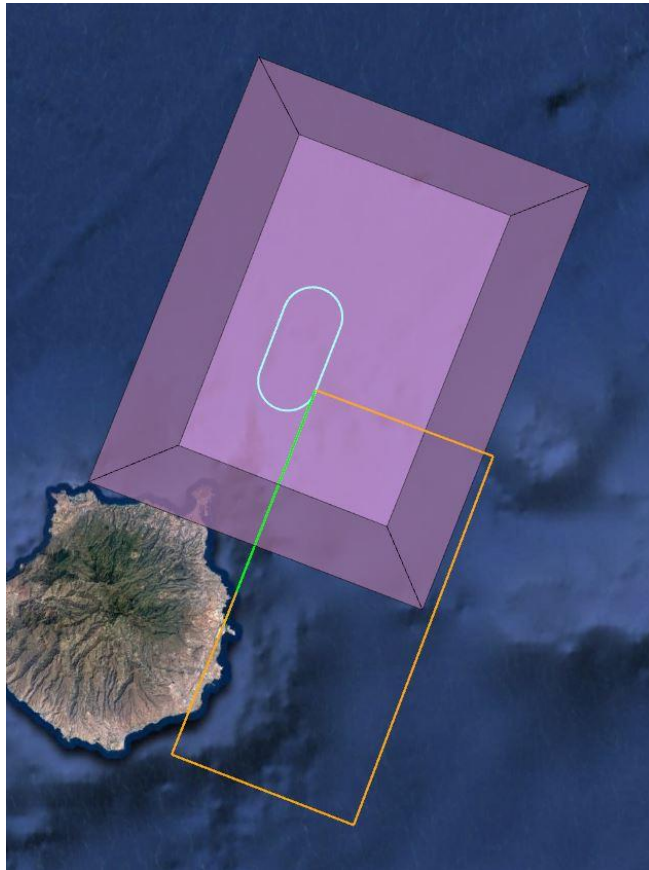


Figura 13.7: Protección del circuito de espera

- Protección para la aproximación inicial: el margen de su área principal es de 300 metros, y en el área secundaria este se reduce hasta los 0 metros.
- Protección para la aproximación intermedia: el área principal cuenta con un margen de 150 metros, mientras que el área secundaria se reduce hasta los 0 metros. Esto es igual para las dos partes del tramo, siendo independiente de la anchura total.
- Protección para el tramo de precisión: es la protección obtenida gracias a las OAS y ha de cumplir con el margen de 49 metros por debajo de este conjunto de superficies.



Figura 13.8: Protección de los tramos de aproximación inicial, intermedia y final

- Protección para la aproximación frustrada: se sigue un margen de 30 metros en el tramo intermedio, mientras que en el tramo final pasa a ser de 50 metros.

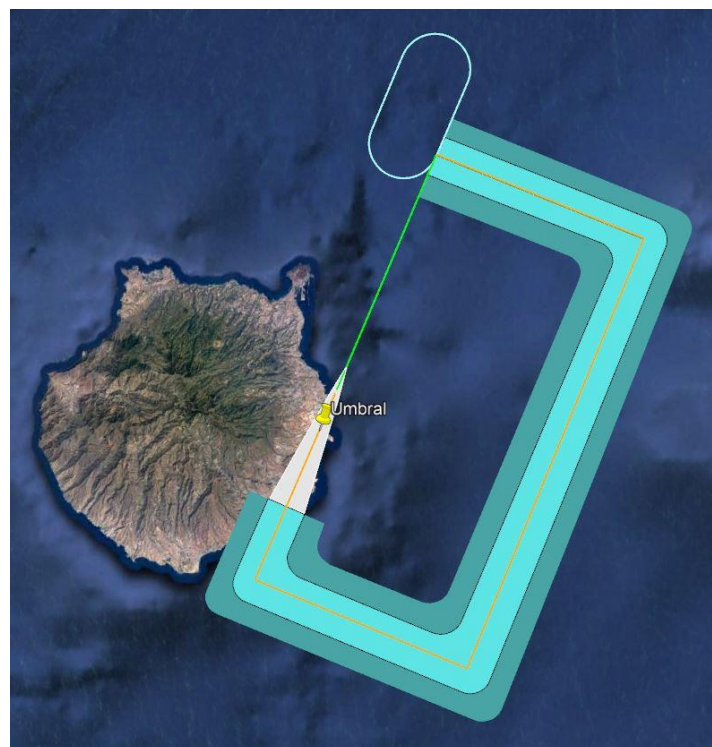


Figura 13.9: Protección del tramo de aproximación frustrada

Finalmente, una vez mostradas cada parte de la aproximación y sus respectivas superficies de protección se entiende completado el proceso de diseño que resulta tal y como se puede observar en la figura 13.10.

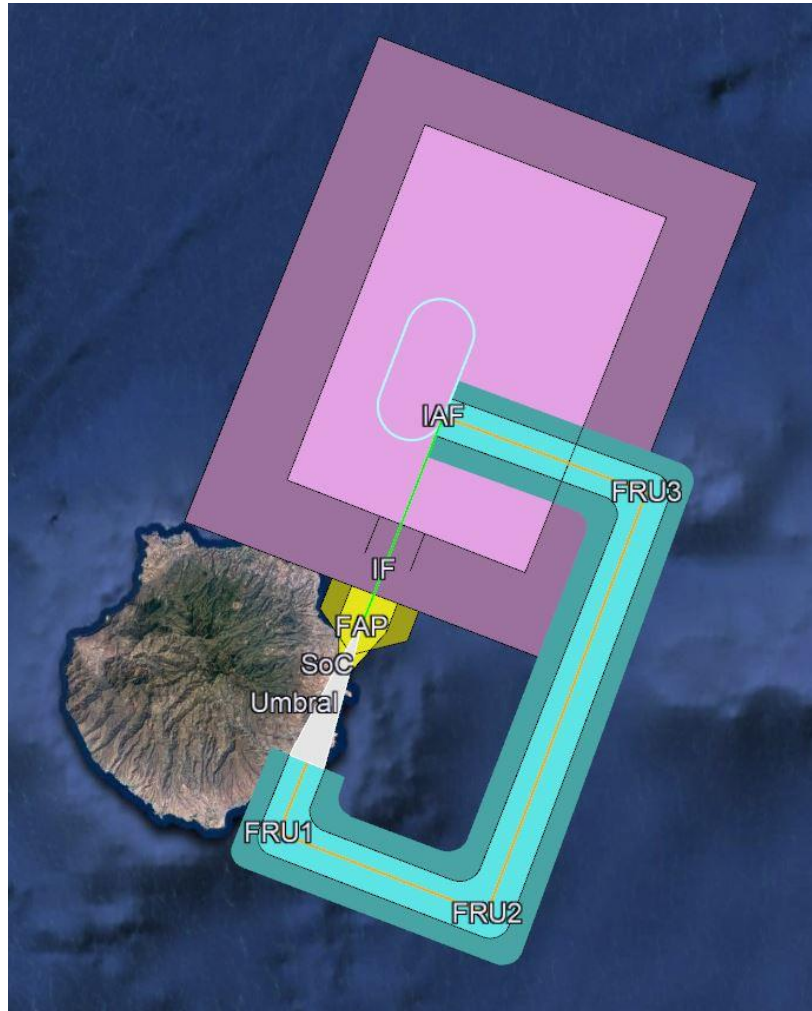


Figura 13.10: Protección de la aproximación completa

Además, cabe recordar que cada una de las superficies de protección ha sido evaluada con respecto a los obstáculos que se encuentran en esa zona, dando como resultado una única zona vulnerada, que se trata de las OAS, dando como resultado una altura de decisión de 57 metros, que es aproximadamente igual a 186 pies, por lo que se encuentra dentro de los 200 pies máximos de las aproximaciones LPV-200.

Capítulo 14

Conclusiones sobre el diseño de la aproximación

A lo largo de esta segunda parte del proyecto, se ha procedido con el diseño completo del procedimiento de aproximación del tipo SBAS LPV-200 relativo a la pista 21R del aeropuerto de Gran Canaria. Este tipo de aproximación forma parte del conjunto de aproximaciones basadas en prestaciones, diferenciándose de manera específica por el uso de guiado tanto vertical como lateral y haciendo uso del sistema SBAS que proporciona servicio a su zona. Además, cabe recordar que ofrece una aproximación con una altura de decisión de 200 pies, facilitando así la toma de decisiones en los momentos previos al aterrizaje.

La base sobre la que se ha fundamentado este diseño es el documento 8168 de la OACI, siendo su parte III el apartado que trata los procedimientos basados en prestaciones, del cual se ha obtenido la gran mayoría de la información expuesta.

El documento 8168 de la OACI ofrece una información muy detallada de cada una de las partes del proceso, ayudando a cumplir con todos los objetivos del diseño. Los objetivos cumplidos durante el desarrollo de este diseño se pueden dividir en 3 partes fundamentales: en primer lugar, el cumplimiento de todos los parámetros requeridos, como pendientes o longitudes, dentro de cada uno de los tramos de la aproximación; en segundo lugar, el estudio y diseño de los márgenes de franqueamiento de obstáculos entorno a todo el proceso; y, por último, como punto de vital importancia, el desarrollo de los puntos de referencia que conforman la aproximación así como el tipo de cada uno de ellos.

Finalmente, cabe destacar de nuevo que la implantación de este tipo de aproximaciones SBAS en aeródromos como el de Gran Canaria, en el cual ya se dispone de sistema ILS resulta muy práctico con el fin de añadir redundancia a las aproximaciones y servir como opción en determinadas ocasiones en las cuales el sistema ILS no se encuentre operativo, facilitando así las operaciones dentro del aeródromo.

DOCUMENTO IV
PLIEGO DE CONDICIONES

Capítulo 15

Condiciones generales

15.1 General

La realización de este trabajo de fin de grado se realiza en su totalidad del tiempo sentado enfrente de un ordenador con las determinadas condiciones suficientes como para poder seguir sus pasos de manera correcta. Este tipo de operaciones durante un corto periodo de tiempo pueden no producir ninguna clase de riesgo, sin embargo, una vez esta función se lleva a cabo durante una gran extensión de tiempo, los riesgos aumentan en gran manera haciendo que se den las condiciones necesarias para poder desarrollar ciertos problemas de salud.

Es por ello que, con la expansión del uso de ordenador y pantallas dentro de diferentes ámbitos laborales, se desarrolló la necesidad de establecer unos factores mínimos que se han de cumplir en este tipo de ocupaciones. Por tal motivo se elaboró el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril [51] con el fin de estandarizar la situación dentro de este entorno.

De tal forma, el real decreto mencionado detalla las especificaciones de condiciones de trabajo de forma general para, más adelante, mostrar en el apartado relativo a las especificaciones técnicas, los parámetros que se han de cumplir en este trabajo de manera específica.

A modo de resumen el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril puede dividirse en 3 partes. La primera de ellas es la parte en la que se expone la función de este real decreto junto con las definiciones que evitan los posibles malentendidos asociados a los términos usados.

La segunda parte de este real decreto se puede entender como la parte en la cual se exponen los derechos del empleado junto con las obligaciones del empresario. Esta parte englobaría los artículos 3, 4 5 y 6, en los que se detalla la obligación por parte de la empresa de ofrecer al empleado una atención a su persona en forma de vigilancia a su salud y de respeto por el tiempo y esfuerzo que este dedica a las tareas, con el fin de no provocar situaciones de perjuicio para el empleado. Además, en esta parte también se trata el nivel de información y formación que ha de tener el trabajador y sus derechos en forma de los métodos de evaluación del cumplimiento de la ley por parte de la empresa.

Finalmente, la tercera parte del real decreto hace referencia al anexo, en el cual se explica de manera precisa cada una de las partes que condicionan el desarrollo de las tareas del empleado. Asimismo, por una parte, dentro de esta sección se habla del

equipo necesitado por el trabajador en forma de materiales, de manera que pueda cumplir con su función de manera correcta. Y, por otra parte, se detallan las condiciones del entorno en el cual se ha de llevar a cabo las tareas asignadas al trabajador sin este estar condicionado por su alrededor.

15.2 Especificaciones técnicas

15.2.1 Objeto

Como complemento al Real Decreto 488/1997 del 14 de abril, las especificaciones técnicas muestran de manera detallada las condiciones que se han de cumplir para que este trabajo de fin de grado pueda ser completado.

15.2.2 Condiciones de los materiales

15.2.2.1 Hardware

El primer requisito para poder elaborar este trabajo es disponer del equipo físico necesario para llevar a cabo el proceso. En este caso, el único equipo necesario es disponer de un ordenador. Sin embargo, las características de este ordenador han de ser lo suficientemente buenas como para poder procesar cada uno de los programas que se emplean en el proceso. Además, se requiere también que se disponga de una capacidad suficiente como para que los procesos de mayor tamaño puedan ser finalizados en un periodo de tiempo comprensible.

Como base para el estudio del *hardware*, se elige la aplicación que mayores requerimientos necesita, que es el programa PEGASUS. Los requisitos del *hardware* vendrán determinados por PEGASUS, que necesita las siguientes condiciones para operar de manera correcta: un procesador Intel Pentium-n, u otro compatible, con un mínimo de 350 MHz de velocidad de lectura; un almacenamiento de disco duro de 60 MB para su instalación; una memoria RAM de 128 MB; y un espacio de 1 GB para el procesamiento de los datos. Además, se recomienda siempre el uso de un ordenador de condiciones superiores, ya que un mínimo desgaste puede ocasionar errores en el funcionamiento de la aplicación.

15.2.2.2 Software

El empleo de aplicaciones muy específicas aumenta en gran medida la dificultad de este trabajo, por lo que para cada una de las aplicaciones que se expondrán a continuación se ha de contar con su manual de instrucciones. Asimismo, se hace uso

de aplicaciones de uso común por la mayoría de trabajos y entornos, de los cuales hay una gran cantidad de información de fácil alcance, por lo que la recomendación anterior se explicita a los programas de menor uso comercial.

A continuación, se expone cada uno de los programas que han sido requeridos a lo largo de este trabajo de fin de grado, siendo siempre sustituibles por aplicaciones similares, de las cuales no se garantiza su correcto funcionamiento.

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Microsoft PowerPoint
- Microsoft Edge
- Paint
- Consola MS-DOS de Windows
- WinRAR
- Google Chrome
- Google Earth
- Matlab
- Hatanaka
- TEQC
- WinSCP
- PEGASUS 19.07.03: en sus módulos *Convertor*, *GNSS_Solution*, *M-File Runner* y *XPL_Estimation*.

15.2.3 Condiciones de la ejecución

15.2.3.1 Conexión a Internet

La conexión a Internet ha resultado ser una parte fundamental para el desarrollo de este trabajo. Además, ha sido necesario que la calidad de la red fuese muy buena, para así poder operar con la suficiente rapidez y emplear un tiempo normal para cada una de las partes del proyecto. Como resumen, la conexión a Internet ha sido necesaria para una gran cantidad de procesos como lo son los siguientes: comunicarse con el tutor del trabajo, descargar e instalar las aplicaciones de las que no se disponía previamente, descargar la gran cantidad de ficheros que se han empleado y la obtención de documentos de ayuda disponibles a través de Internet.

15.2.3.2 Conocimientos previos

En primer lugar, de manera transversal a todos los ámbitos, el conocimiento del idioma inglés resulta fundamental a la hora de obtener y entender la gran mayoría de información. Se requiere también de una formación y experiencia suficiente como para

poder acometer con esta tarea de una gran extensión y con grandes dificultades a lo largo de la misma. Además, resulta de gran importancia la capacidad de adaptación a la hora de tratar con nuevos programas como son los programas de uso específico empleados en este trabajo.

Por otra parte, en un plano más específico, se requiere de unos conocimientos amplios en el campo de la aeronáutica, incidiendo en especial en la parte destinada a la aeronavegación.

15.2.3.3 Conocimientos informáticos

Como conocimientos informáticos, se requiere de una determinada experiencia en cuanto a ofimática, centrándose en el uso de las aplicaciones proporcionadas por Microsoft Office. Además, resulta fundamental la facilidad a la hora de usar los navegadores web y programas de edición de imágenes.

15.2.3.4 Supervisión

Las personas sobre las que recaiga la tarea de supervisión del trabajo expuesto deben demostrar grandes conocimientos dentro del ámbito en el cual se enmarca este proyecto. Por otra parte, como paso final, la supervisión y validación final de este estudio recaería sobre las autoridades pertinentes dentro del ámbito estatal.

DOCUMENTO V

PRESUPUESTO

Capítulo 16

Presupuesto

El estudio del presupuesto se analiza explicando, en una primera instancia, como se calculan los costes asociados a cada una de las partes del trabajo, para, más adelante, pasar a documentar de manera detallada cada uno de los costes que se han acontecido a lo largo del desarrollo del proyecto determinando finalmente el coste total del proceso. Cabe remarcar que este estudio se elabora aproximando siempre con la mayor integridad posible a la realidad en el momento de su realización.

16.1 Introducción

Los costes asociados a este trabajo de fin de grado se pueden dividir en 3 grupos: los costes de personal, los costes de material y los costes indirectos. A continuación, se detalla cada uno de estos tipos de costes con el fin de comprender mejor el desglose de costes que se producirá en la siguiente parte del capítulo.

16.1.1 Costes de personal

Los costes de personal se refieren a la remuneración que cada una de las personas participantes en este trabajo haya de recibir por los servicios prestados. En el caso de este trabajo se entiende que trabajan directamente en él, el alumno, el tutor del alumno y su cotutor.

El coste viene determinado por el número de horas de trabajo y el coste de cada una de esas horas. En primer lugar, la cantidad de horas trabajadas se establece en 30 para cada uno de los tutores, teniendo en cuenta reuniones y resolución de dudas surgidas al alumno. En cuanto al alumno que desarrolla el proyecto, el número de horas trabajadas se estima en base a las 4 horas de trabajo diarias en días lectivos, es decir, 20 horas semanales, durante 4 meses, dando como resultado 360 horas dedicadas a este trabajo.

Por otra parte, el coste horario se estima dividiendo los salarios brutos anuales entre el número de horas trabajadas anualmente. El primer dato viene dado por el salario bruto anual vigente de un ingeniero doctorado, 40.000 euros, y de un ingeniero graduado, 22.000 euros.

En segundo lugar, el número de horas trabajadas al año se calcula teniendo en cuenta que cada semana se trabaja 40 horas y multiplicando este dato por las 48 semanas lectivas que hay en un año, dando lugar a las 1840 horas anuales que se estiman para cada ocupación.

Finalmente, los resultados en cuanto a coste horario para cada ocupación, ofrecen los valores de 21.74 euros por hora para un ingeniero doctor, y 11.95 euros por hora para un ingeniero graduado.

16.1.2 Costes de *software* y equipos

De forma análoga a los costes de personal, en este caso el coste de cada uno de los equipos también se calcula multiplicando la cantidad de tiempo de uso de estos equipos por el precio horario que se establece para cada uno de ellos. Además, se ha de tener en cuenta la amortización que se le dé a cada uno de los equipos. A continuación, se exponen las ecuaciones con las que se llega al coste horario de cada equipo.

$$A = \frac{P_C - P_A}{t}$$

$$T_h = \frac{A}{h}$$

En las que los términos hacen referencia a las siguientes definiciones:

- A: Coste de amortización (euros / año).
- P_C: Precio del equipo en el momento de compra (euros).
- P_A: Precio del equipo al vencer el tiempo de amortización (euros).
- t: Tiempo de amortización (años).
- T_h: Coste horario asociado al equipo (euros / hora).
- h: Horas de uso por año.

16.1.3 Costes indirectos

Los costes indirectos son todos aquellos costes derivados de la propia elaboración del trabajo, como pueden ser los gastos en electricidad, agua y similares. La estimación de estos gastos es muy difícil, por lo que estos se harán proporcionales al gasto total en un 5% del mismo.

16.2 Desglose de costes

Se pasa a continuación al detalle de cada uno de los costes que van relacionados con el desarrollo de este trabajo.

16.2.1 Desglose de costes de personal

Este apartado consiste simplemente en obtener los gastos descritos en la introducción del capítulo. En la tabla 16.1 se observan detallados la remuneración que ha de recibir cada una de las personas junto con el total de este apartado.

Personal	Horas de trabajo	Coste horario (euros / hora)	Importe (euros)
Ing. doctor	30	21.74	652.20
Ing. doctor	30	21.74	652.20
Ing. graduado	360	11.95	4302
Total			5606.40

Tabla 16.1: Desglose de costes de personal

16.2.2 Desglose de costes de software y equipos

El objetivo de esta sección se basa en el análisis de todos aquellos equipos y aplicaciones que se hayan obtenido de manera gratuita, como son la gran mayoría de aplicaciones.

A continuación, se enumeran cada uno de estos, ofreciendo una detallada descripción y un breve estudio de su amortización a lo largo del tiempo:

- MSI GL72MVR 7RFX:

El precio inicial de este ordenador es de 1700 euros. Entendiendo que su tiempo de amortización es de 3 años, y asumiendo que su precio en tal momento equivale a un 20% del precio inicial:

$$A = \frac{1700 - 340}{3} = 453.33 \text{ euros / año}$$

Y su tasa horaria será la siguiente:

$$T_h = \frac{453.33}{1840} = 0.2464 \text{ euros / hora}$$

- Paquete Office de Microsoft:

El precio del paquete es de 69 euros al año. Además, este paquete carece de amortización ya que su funcionamiento es estático en el tiempo. Por lo tanto, los cálculos son los siguientes:

$$A = \frac{69}{1} = 69 \text{ €/año}$$

$$T_h = \frac{69}{1840} = 0,0375 \text{ €/hora}$$

- MATLAB R2020b:

De la misma forma que el paquete de Microsoft, la aplicación MATLAB carece de amortización. Asimismo, su precio es de 800 euros al año.

$$A = \frac{800}{1} = 800 \text{ €/año}$$

$$T_h = \frac{800}{1840} = 0,435 \text{ €/hora}$$

Una vez explicados cada uno de los componentes no gratuitos, se procede a ofrecer el coste conjunto de estos equipos y *software* asociado al trabajo.

Componente	Horas de uso	Tasa horaria (euros / hora)	Importe (euros)
Ordenador MSI	360	0.2464	88.70
Paquete Office	360	0.0375	13.50
MATLAB R2020b	360	0.435	156.60
Total			258.80

Tabla 16.2: Desglose de costes de software y equipos

16.2.3 Desglose de costes indirectos

Como se ha comentado previamente, estos costes equivalen a un 5% del total de las dos categorías previas de costes. De tal forma, el coste indirecto asciende al valor de los 293.26 euros.

16.2.4 Costes totales

El coste total de la elaboración del trabajo constituye la suma de los costes de los apartados anteriores añadiendo un 21% de IVA al resultado final. En el siguiente cuadro se puede observar el desglose:

Concepto	Importe (euros)
Subtotal personal	5606.40
Subtotal <i>software</i> y equipos	258.80
Costes indirectos	293.26
Total (sin IVA)	6158.46
IVA	1293.28
Total (con IVA)	7451.74

Tabla 16.3: Costes totales

Finalmente, se llega a la conclusión de que el presupuesto total para el trabajo de fin de grado es de SIETE MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA Y UN EUROS CON SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

Bibliografía

- [1] *European Global Navigation Satellite Systems Agency.* (abril de 2021). *EGNOS User Support: LPV PROCEDURES MAP.* Recuperado de https://egnosuser-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map
- [2] Sanz Subirana, J., Zornoza, J.M. y Hernández-Pajares, M. (mayo de 2013). *GNSS Data Processing, Vol.I: Fundamentals and Algorithms.* European Space Agency.
- [3] T.Powers, S., Parkinson, B. (Mayo, junio de 2010). *The Origins of GPS.* Recuperado de https://www.ublox.com/sites/default/files/the_origins_of_gps.pdf
- [4] Navipedia. (7 de mayo de 2021). *GPS Space Segment.* Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment
- [5] Navipedia. (7 de mayo de 2021). *GPS Ground Segment.* Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Ground_Segment
- [6] Navipedia. (7 de mayo de 2021). *GPS User Segment.* Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_User_Segment
- [7] Garrido-Villén, N. (7 de mayo de 2021). Señal GPS-GNSS: portadora, código y mensaje (5). Universidad Politècnica de València.
- [8] *U.S. Government.* (7 de mayo de 2021). *Modernization: New Civil Signals.* Recuperado de <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [9] *U.S. Government.* (7 de mayo de 2021). *Modernization: Space Segment.* Recuperado de <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations>
- [10] Wikipedia. (11 de mayo de 2021). GLONASS. Recuperado de <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>
- [11] Navipedia. (11 de mayo de 2021). *Galileo Future and Evolutions.* Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Future_and_Evolutions
- [12] Navipedia. (11 de mayo de 2021). *Galileo Architecture.* Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Architecture
- [13] Wolfgang Hein, G., Godet, J., Issler, J.L., Martin, J.C. (septiembre de 2001). *International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation: The Galileo Frequency Structure and Signal Design.* Salt Lake City, Utah, USA.
- [14] Navipedia. (11 de mayo de 2021). NAVIC. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC#IRNSS_Architecture
- [15] Quintanilla García, I. (2017). Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía. Tema III.3: Sistemas de Aumentación basados en satélites. Universitat Politècnica de València.

- [16] Navipedia. (23 de mayo de 2021). *GNSS Performances*. Recuperado de https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Performances
- [17] Kaplan, E.D., Hegarty, C.J. (2006). *Understanding GPS Principles and Applications*. Artch House, 2nd Ed.
- [18] *European Global Navigation Satellite Systems Agency*. (4 de mayo de 2021). *EGNOS Safety of Life (Sol): Service Definition Document*. Revisión 3.3.
- [19] Flament, D., Poumailloux, J., Damidaux, J.-L., Lannelongue, S. VenturaTraveset, J., Michel, P., Montefusco, C. (1 de diciembre de 2006). *The EGNOS System Architecture explained*. *European Space Agency*.
- [20] *European Global Navigation Satellite Systems Agency*. (3 de octubre de 2017). *EGNOS Open Service (OS): Service Definition Document*. Revisión 2.3.
- [21] *European Global Navigation Satellite Systems Agency*. (3 de junio de 2019). *EGNOS Data Access Service (EDAS). Service Definition Document*. Revisión 2.1.
- [22] *European Organisation for the Safety of Air Navigation*. (enero de 2013). *Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP)*. Recuperado de <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/2013-introducing-pbn-a-rnp.pdf>
- [23] Unión Europea, Eurocontrol. (2015). *The Roadmap for Delivering High Performing Aviation for Europe: European ATM Master Plan*. Recuperado de <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/sesar/doc/eu-atm-master-plan-2015.pdf>
- [24] *International Civil Aviation Organization*. (2013). *Performance – Based Navigation (PBN) Manual*. Cuarta Edición.
- [25] *IGS, RINEX Working Group, Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104*. (19 de junio de 2021). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format*. Version 3.03
- [26] Lou Estey, UNAVCO. (10 de diciembre de 2007). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. *Werner Gurtnter Astronomical Institute, University of Berne*.
- [27] Instituto Geográfico Nacional. Estaciones Permanentes GNSS. Recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal/mas-informacion-gnss>
- [28] Cartográfica de Canarias, S. A. Web de GRAFCAN. Recuperado de <https://www.grafcan.es/>
- [29] *European Global Navigation Satellite Systems Agency*. (19 de junio de 2021). *EDAS Downloads*. Recuperado de https://egnos-user-support.esspsas.eu/new_egnos_ops/services/edas-service/downloads
- [30] WinSCP. *WinSCP 5.19 Download*. Recuperado de <https://winscp.net/eng/download.php>

- [31] *Geospatial Information Authority of Japan*. (19 de junio de 2021). HATANAKA. Recuperado de <https://terras.gsi.go.jp/ja/crx2rn.html>
- [32] UNAVCO. (19 de junio de 2021). TEQC – *The Toolkit for GNSS Data*. Recuperado de <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>
- [33] *GNSS Tools Team*. (19 de junio de 2021). *PEGASUS Software User Manual*. EUROCONTROL
- [34] Celestrak. *GPS Yuma Almanacs 2019*. Recuperado de <http://celestrak.com/GPS/almanac/Yuma/2019/>
- [35] ESSP. (2020). *Monthly Performance Report - September 2020*. Toulouse.
- [36] ESSP. (2020). *Monthly Performance Report - October 2020*. Toulouse.
- [37] ESSP. (2020). *Monthly Performance Report - November 2020*. Toulouse.
- [38] ESSP. (2020). *Monthly Performance Report - December 2020*. Toulouse.
- [39] ESSP. (2021). *Monthly Performance Report - January 2021*. Toulouse.
- [40] ESSP. (2021). *Monthly Performance Report - February 2021*. Toulouse.
- [41] OACI Doc 8168: Operación de Aeronaves. Vol II. (2019) (6th ed.)
- [42] *International Civil Aviation Organization*. (2013). *Performance – Based Navigation (PBN) Manual*. Cuarta Edición.
- [43] Aeropuerto de Gran Canaria (11 de julio de 2021). Guía informativa del Aeropuerto de Las Palmas de Gran Canaria (LPA). Recuperado de <https://www.grancanaria-airport.net/es/>
- [44] AENA (11 de julio de 2021). Presentación del aeropuerto GCLP. <https://portal.aena.es/es/aerolineas/gran-canaria.html>
- [45] AIP (11 de julio de 2021). Carta de aproximación por instrumentos OACI ILS Z RWY 21R. Recuperado de https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/GCLP/LE_AD_2_GCLP_IAC_7_en.pdf
- [46] Microsiervos (11 de julio de 2021). Iberia retira su último B-747. Recuperado de <https://www.microsiervos.com/archivo/aerotrastorno/iberia-retira-ultimo-b747.html>
- [47] Wikipedia (11 de julio de 2021). Boeing 747-400. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Boeing_747-400
- [48] Aviation Explorer (11 de julio de 2021). Boeing B747-400. Recuperado de http://www.aviationexplorer.com/747_facts.htm
- [49] Web Archive (11 de julio de 2021). *Boeing 747-400 description*. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20061026095535/http://www.boeing.com/commercial/airports/acaps/7474sec2.pdf>

- [50] Skybrary (11 de julio de 2021). *Boeing B747-400 (international, winglets)*. Recuperado de <https://www.skybrary.aero/index.php/B744>

- [51] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (23 de abril de 1997). Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. Recuperado de <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/488/con>