



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA




Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER HABILITANTE EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

Diseño y Validación de un Procedimiento de Aproximación empleando GNSS/SBAS para el Aeropuerto de Teruel

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Autora: María del Carmen Furquet Gascón

Fecha: 20 de junio de 2018

Tutor: Israel Quintanilla García

Cotutor: Pedro Yuste Pérez

Agradecimientos

Antes de comenzar con la descripción del proyecto, quisiera agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible la consecución del título de Máster en Ingeniería Aeronáutica, así como la realización del Trabajo de Fin de Máster.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor, el Dr. Israel Quintanilla, por brindarme la oportunidad de realizar el trabajo expuesto a continuación bajo su tutela, así como por su gran dedicación como tutor y profesor, transmitiendo su pasión y conocimientos en sistemas de navegación globales. También a mi cotutor Pedro Yuste por poner a mi alcance sus conocimientos en diseño de procedimientos y sistemas de navegación, así como por su atención, dedicación, afabilidad y entrega con el proyecto que he realizado, también, bajo su tutela.

También agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) y a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por la oportunidad de cursar este título de máster y su impartición amparada por la excelencia académica del mismo.

Agradecer a mis padres su gran apoyo a lo largo de estos dos años de máster y su preocupación continua, a mi hermano por su admiración hacia mi trabajo, a mi abuelo por la incommensurable ilusión que demostró en vida durante toda mi progresión académica y a mi abuela por su entusiasmo, pese a que pudo estar presente tan sólo durante dos de los seis años que ocupa la ingeniería superior. Agradecer también a Paula, Jorge, Nicolás, Fabián, Carlos, Asensio, Aurora, Javier, Claudia, Alejandro, Valeria y Salvador su valioso apoyo e infinita paciencia como compañeros y amigos.

También quisiera hacer especial mención a mis amigos María y Amparo y a mi novio, Pepe, su incondicional apoyo, admiración sincera y el cariño brindado en los momentos más difíciles de estos dos años de máster.

Finalmente, agradecer a todos mis compañeros de la universidad que han compartido conmigo estos dos años de estudio, repletos de experiencias y en los que el tiempo ha pasado muy rápido.

Resumen

En el presente documento, se recoge la memoria del Trabajo de Fin de Máster con título "Diseño y validación de un procedimiento de aproximación empleando GNSS/SBAS para el Aeropuerto de Teruel". Dicho proyecto se ha realizado como culminación del Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

El trabajo se integra de dos grandes partes. En cada una de ellas se desarrolla el proceso necesario para alcanzar los objetivos de validación y diseño del procedimiento de aproximación.

La primera de dichas partes expone el diseño de las rutas que componen los procedimientos de aproximación a ambas cabeceras de pista para el aeropuerto de Teruel. Para ello, se han empleado los requerimientos RNP propios del servicio LPV-200 que, actualmente, ofrece también el SBAS europeo EGNOS. La aeronave de referencia es un Boeing 747-800, dado que es la mayor de las aeronaves que hacen uso frecuente del aeropuerto.

La segunda parte desarrolla el procedimiento de validación requerido por la OACI de las rutas ya diseñadas. Para ello, se verifica el cumplimiento de los mínimos por parte del servicio LPV-200. Se ha empleado el *software* de Eurocontrol PEGASUS para obtener los resultados que se muestran en la memoria. Cabe destacar que, de dicho proceso, se han realizado tan solo las dos primeras partes de toma de datos a largo plazo y campaña sobre el terreno.

El presente proyecto no tiene una única finalidad. Por un lado, se busca la asimilación y asentamiento de las bases necesarias para el futuro desarrollo de la navegación aérea en el aeropuerto de Teruel. Por otro lado, se pretende mejorar el dominio y comprensión de la documentación europea empleada en el diseño de los procedimientos de navegación aérea.

Índice general

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XIII
Nomenclatura	XV
Introducción General	1
Motivación	3
Objetivos	5
1. Parte I: Diseño de una aproximación PBN basada en GNSS	7
1.1. Introducción	9
1.2. Aeropuerto de Teruel	10
1.2.1. Descripción	10
1.2.2. Historia del Aeropuerto	13
1.2.3. Geografía y clima	15
1.2.4. Espacios aeronáuticos	17
1.2.5. Actividades en el aeropuerto	18
1.2.6. Flota usuaria	20
1.3. Descripción de las principales aeronaves usuarias del aeropuerto	21
1.3.1. Descripción del avión Boeing 747	21
1.3.2. Descripción del avión Airbus A320	23
1.4. Navegación Basada en Prestaciones (PBN)	27
1.4.1. Descripción	27
1.4.2. Operaciones PBN	29
1.4.3. Navegación PBN y los sistemas GNSS	31
1.5. Aproximación LPV-200	33
1.5.1. Fases de una aproximación	33
1.5.2. Descripción de una aproximación LPV-200	34

1.5.3.	Beneficios de LPV-200	35
1.5.4.	Requerimientos	36
1.6.	Actualidad y futuro de la navegación aérea en el aeropuerto de Teruel	38
1.7.	Procedimiento RNP APCH LPV-200	40
1.7.1.	Introducción	40
1.7.2.	Generalidades de la operación	40
1.7.3.	Descripción de los requerimientos de la operación	41
1.7.4.	Descripción de las generalidades de los tramos de la operación	51
1.8.	Construcción del procedimiento de aproximación para la pista 18	64
1.8.1.	Tramo de aproximación inicial	64
1.8.2.	Tramo de aproximación intermedio	66
1.8.3.	Tramo de aproximación final	67
1.8.4.	Aproximación frustrada	72
1.8.5.	Resumen de la ruta	74
1.8.6.	Superficies de protección horizontal de la ruta	75
1.9.	Construcción del procedimiento de aproximación para la pista 36	81
1.9.1.	Tramo de aproximación inicial	81
1.9.2.	Tramo de aproximación intermedio	82
1.9.3.	Tramo de aproximación final	83
1.9.4.	Aproximación frustrada	87
1.9.5.	Resumen de la ruta	89
1.9.6.	Superficies de protección horizontal de la ruta	91
1.10.	Conclusiones	96
2.	Parte II: Ensayos de vuelo mediante un procedimiento SBAS con requerimientos LPV-200	97
2.1.	Introducción	99
2.2.	Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)	100
2.2.1.	Descripción	100
2.2.2.	GPS o Global Positioning System	102
2.2.3.	GLONASS o Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema	103
2.2.4.	Galileo	104
2.2.5.	Beidou	105
2.2.6.	IRNSS o NAVIC	106
2.2.7.	QZSS	106
2.3.	Sistemas de Aumentación	107
2.3.1.	GBAS	107
2.3.2.	SBAS	108

2.3.3. ABAS	117
2.4. LPV-200	118
2.4.1. Descripción	118
2.4.2. Beneficios de su implementación	119
2.4.3. Implementación	121
2.4.4. Implementación en España	124
2.4.5. Requerimientos	125
2.5. Validación de procedimientos SBAS	132
2.5.1. Campaña de toma de datos a largo plazo	132
2.5.2. Campaña sobre el terreno	132
2.5.3. Ensayos de vuelo	133
2.6. Formato, obtención y manipulación de datos	134
2.6.1. Formato RTCM	134
2.6.2. NTRIP	134
2.6.3. Formato NMEA	134
2.6.4. Formato RINEX	135
2.6.5. Obtención de datos	143
2.6.6. Servidor FTP	144
2.6.7. Ficheros SBAS	146
2.6.8. Hatanaka	148
2.6.9. TEQC	149
2.7. PEGASUS	151
2.7.1. Módulo Convertor	152
2.7.2. Módulo GNSS Solution	152
2.7.3. Módulo MFile Runner	153
2.7.4. Módulo XPL Estimation	155
2.8. Resultados obtenidos	157
2.8.1. Campaña de toma de datos a largo plazo	157
2.8.2. Campaña sobre el terreno	159
2.9. Conclusiones	181
3. Parte III: Conclusiones Generales, Pliego de Condiciones y Presupuesto	183
3.1. Conclusiones Generales	185
3.2. Pliego de Condiciones	187
3.2.1. Condiciones Generales	187
3.2.2. Condiciones de especificaciones técnicas	194
3.3. Presupuesto	197
3.3.1. Introducción	197

3.3.2.	Estado de mediciones	198
3.3.3.	Desglose de costes unitarios	199
3.3.4.	Desglose de costes totales	201
3.3.5.	Resumen del presupuesto total	202
4.	Parte IV: Anexos	203
4.1.	Anexos	205
4.1.1.	Anexo 1 - Programas de Matlab	205
4.1.2.	Anexo 2 - Hojas de Excel	206
4.1.3.	Anexo 3 - Archivos de PEGASUS	206
4.1.4.	Anexo 4 - PDF de la estación TERU	207

Índice de figuras

1.1. Ubicación de la ciudad de Teruel	11
1.2. Detalle ubicación de la ciudad de Teruel	11
1.3. Ubicación del aeropuerto de Teruel	12
1.4. Croquis del antiguo aeródromo militar de Caudé	14
1.5. Aeronave Boeing 747-800	21
1.6. Planta, alzado y perfil del Boeing 747-800	22
1.7. Aeronave Airbus A320-200neo	24
1.8. Vista en planta del Airbus A320-200neo	25
1.9. Vista de alzado y perfil del A320-200neo	25
1.10. RNP y RNAV según fases de vuelo	28
1.11. Clasificación de operaciones de OACI	29
1.12. Especificaciones PBN	30
1.13. Especificaciones PBN en aproximación	30
1.14. Especificaciones PBN en guiado vertical	31
1.15. GNSS en fase de Aproximación	32
1.16. Fases de una aproximación según OACI 8168	34
1.17. Clasificación LPV-200 como RNP APCH	35
1.18. Llegadas visuales al aeropuerto de Teruel	38
1.19. Tabla de velocidades (IAS) para el cálculo de procedimientos en km/h	42
1.20. Distribución de áreas en Protección Vertical según OACI 8168	44
1.21. Valores Intermedios de RNP	46
1.22. Protección de viraje RF	47
1.23. Diferencia entre punto de recorrido de paso y de sobrevuelo	48
1.24. Guía para la determinación de velocidades en virajes	48
1.25. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)	49
1.26. Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades SI, 25° de ángulo de inclinación lateral)	49

1.27. Distancia mínima de estabilización entre puntos de sobrevuelo (unidades SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)	50
1.28. Distancia mínima de estabilización entre puntos de sobrevuelo (unidades SI, 25° de ángulo de inclinación lateral)	50
1.29. Velocidades para el diseño de la espera	53
1.30. Gráfica para el cálculo del radio de giro y velocidad angular para el viraje de espera	54
1.31. Franqueamiento de obstáculos en espera	55
1.32. Tabla de conversión de IAS a TAS	57
1.33. Sistema de coordenadas	60
1.34. Superficies OAS (1)	61
1.35. Superficies OAS (2)	62
1.36. Aproximación a la pista 18	67
1.37. Perfil de elevación de la aproximación a la pista 18	68
1.38. Soporte lógico de OAS de los PANS-OPS	69
1.39. Plantilla de superficies OAS en 2D	69
1.40. Superficies OAS para la pista 18	70
1.41. Aproximación frustrada para la pista 18	74
1.42. Perfil vertical para la aproximación frustrada de la pista 18	74
1.43. Ruta completa de aproximación para la pista 18	75
1.44. Protección lateral para la aproximación a la pista 18	76
1.45. Protección lateral para la espera en la pista 18	77
1.46. Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 18	77
1.47. Protección lateral para la aproximación completa a la pista 18	78
1.48. Protección lateral para la aproximación a la pista 18	78
1.49. Protección lateral para el hipódromo de esperas de la pista 18	79
1.50. Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 18	79
1.51. Protección lateral para la aproximación completa a la pista 18	80
1.52. Aproximación a la pista 36	84
1.53. Perfil vertical de la aproximación a la pista 36	84
1.54. Superficies OAS para la pista 36	85
1.55. Aproximación frustrada para la pista 36	89
1.56. Perfil de elevación de la aproximación frustrada para la pista 36	89
1.57. Aproximación completa para la pista 36	90
1.58. Protección lateral para la aproximación a la pista 36	92
1.59. Protección lateral para el hipódromo de espera de la pista 36	92
1.60. Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 36	93
1.61. Protección lateral para la aproximación completa de la pista 36	93

1.62. Protección lateral para la aproximación a la pista 36	94
1.63. Protección lateral para el hipódromo de espera de la pista 36	94
1.64. Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 36	95
1.65. Protección lateral para la aproximación completa de la pista 36	95
2.1. Arquitectura GNSS	102
2.2. Constelación GPS	103
2.3. Arquitectura GBAS	108
2.4. Sistemas Arquitectura SBAS	109
2.5. Sistemas SBAS según su área de operación	109
2.6. Satélites GEO del sistema WAAS	112
2.7. Segmento terrestre de EGNOS	113
2.8. Arquitectura EGNOS	116
2.9. Tipo y descripción de mensaje EGNOS	117
2.10. Aeropuertos con aproximaciones WAAS LPV	122
2.11. Aeropuertos con aproximaciones EGNOS LPV	123
2.12. Aeródromos con futuras aproximaciones EGNOS LPV	123
2.13. Aeródromos con aproximaciones EGNOS LPV presentes y futuras en España	124
2.14. Integridad de LPV-200	127
2.15. Diagrama de Stanford	128
2.16. Continuidad del sistema LPV-200	130
2.17. Disponibilidad del sistema LPV-200	131
2.18. Fichero de observación para la estación de Teruel	140
2.19. Fichero de navegación para la estación de Teruel	141
2.20. Ficha de la estación ERGNSS de Teruel	144
2.21. Servidor FTP del IGN	145
2.22. Interfaz del software PAG del IGN	146
2.23. Interfaz del FTP de EDAS	147
2.24. Ventana de comandos empleando HATANAKA	149
2.25. Ventana de comandos empleando TEQC	149
2.26. Interfaz del software PEGASUS de Eurocontrol	151
2.27. Interfaz del módulo Convertor de PEGASUS	152
2.28. Interfaz del módulo GNSS Solution de PEGASUS	153
2.29. Interfaz del módulo MFile Runner de PEGASUS	154
2.30. Interfaz del módulo XPL Estimation de PEGASUS	155
2.31. Fragmento del archivo de almanaque GPS	156
2.32. Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 1 de mayo	160
2.33. Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 2 de mayo	160
2.34. Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 3 de mayo	160

2.35. Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 4 de mayo	161
2.36. Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 5 de mayo	161
2.37. Resultado HSI para el día 1 de mayo de 2018	162
2.38. Resultado VSI para el día 1 de mayo de 2018	163
2.39. Resultado HPE para el día 1 de mayo de 2018	163
2.40. Resultado VPE para el día 1 de mayo de 2018	164
2.41. Diagrama de Stanford horizontal para el día 1 de mayo de 2018	164
2.42. Diagrama de Stanford Vertical para el día 1 de mayo de 2018	165
2.43. Resultado HSI para el día 2 de mayo de 2018	165
2.44. Resultado VSI para el día 2 de mayo de 2018	166
2.45. Resultado HPE para el día 2 de mayo de 2018	166
2.46. Resultado VPE para el día 2 de mayo de 2018	167
2.47. Diagrama de Stanford horizontal para el día 2 de mayo de 2018	167
2.48. Diagrama de Stanford Vertical para el día 2 de mayo de 2018	168
2.49. Resultado HSI para el día 3 de mayo de 2018	168
2.50. Resultado VSI para el día 3 de mayo de 2018	169
2.51. Resultado HPE para el día 3 de mayo de 2018	169
2.52. Resultado VPE para el día 3 de mayo de 2018	170
2.53. Diagrama de Stanford horizontal para el día 3 de mayo de 2018	170
2.54. Diagrama de Stanford Vertical para el día 3 de mayo de 2018	171
2.55. Resultado HSI para el día 4 de mayo de 2018	171
2.56. Resultado VSI para el día 4 de mayo de 2018	172
2.57. Resultado HPE para el día 4 de mayo de 2018	172
2.58. Resultado VPE para el día 4 de mayo de 2018	173
2.59. Diagrama de Stanford horizontal para el día 4 de mayo de 2018	173
2.60. Diagrama de Stanford Vertical para el día 4 de mayo de 2018	174
2.61. Resultado HSI para el día 5 de mayo de 2018	174
2.62. Resultado VSI para el día 5 de mayo de 2018	175
2.63. Resultado HPE para el día 5 de mayo de 2018	175
2.64. Resultado VPE para el día 5 de mayo de 2018	176
2.65. Diagrama de Stanford horizontal para el día 5 de mayo de 2018	176
2.66. Diagrama de Stanford Vertical para el día 5 de mayo de 2018	177

Índice de tablas

1.1. Características y actuaciones del B 747-800	23
1.2. Características y actuación del Airbus A320-200neo	26
1.3. Protección lateral para una aproximación LPV-200 con RNP APCH	43
1.4. Protección lateral para una aproximación LPV-200 empleada	43
1.5. Coordenadas de los puntos que definen las OAS	70
1.6. Tabla de obstáculos para el cálculo de la OCA/H	72
1.7. Valores de la OCA/H para la aproximación a la pista 18	72
1.8. Resumen de la ruta de aproximación a la pista 18	75
1.9. Coordenadas de los puntos que definen las OAS	85
1.10. Tabla de obstáculos para el cálculo de la OCA	87
1.11. Valores de la OCA/H para la aproximación a la pista 36	87
1.12. Resumen de la ruta de aproximación a la pista 36	90
2.1. Fichero de observación RINEX (I)	138
2.2. Fichero de observación RINEX (II)	139
2.3. Fichero de navegación RINEX	142
2.4. Resultados de precisión para la campaña de toma de datos a largo plazo . .	157
2.5. Resultados de integridad para la campaña de toma de datos a largo plazo . .	158
2.6. Resultados de continuidad para la campaña de toma de datos a largo plazo .	158
2.7. Resultados de disponibilidad para la campaña de toma de datos a largo plazo	159
2.8. Resultados de disponibilidad para la campaña de toma de datos a largo plazo	159
2.9. Resumen de los resultados de precisión para la campaña de toma de datos sobre el terreno	161
2.10. Resumen de los resultados de integridad para la campaña de toma de datos sobre el terreno	177
2.11. Resultados de continuidad para la campaña de toma de datos sobre el terreno	178
2.12. Resultados de disponibilidad para el día 1 de mayo de 2018	178
2.13. Resultados de disponibilidad para el día 2 de mayo de 2018	179
2.14. Resultados de disponibilidad para el día 3 de mayo de 2018	179
2.15. Resultados de disponibilidad para el día 4 de mayo de 2018	179

2.16. Resultados de disponibilidad para el día 5 de mayo de 2018	179
2.17. Resumen de los datos de disponibilidad para la campaña de datos sobre el terreno	180
3.1. Equipos informáticos y <i>Software</i>	198
3.2. Montaje e instalación de equipos informáticos y <i>Software</i>	198
3.3. Instalación del <i>software</i> específico	199
3.4. Personal específico	199
3.5. Costes totales de material y <i>software</i>	201
3.6. Costes totales de personal cualificado	202
3.7. Resumen del presupuesto total	202

Nomenclatura

ABAS	<i>Aircraft Based Augmentation System</i>
ACC	<i>Area Control Center</i>
AENA	<i>Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea</i>
AESA	<i>Agencia Estatal de Seguridad Aérea</i>
AL	<i>Alert Limit</i>
AOR-E	<i>Atlantic Ocean Region East</i>
APCH	<i>Approach o Aproximación</i>
APV	<i>Non-Precision Approach with Vertical Guidance</i>
APV-I	<i>Approach with Vertical Guidance</i>
A-RNP	<i>Advanced-Required Navigation Performance</i>
ARP	<i>Aerodrome Reference Point</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility)</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
ATZ	<i>Aerodrome Transit Zone</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satelite System</i>
B-RNP	<i>Basic-Required Navigation Performance</i>
C/A	<i>Coarse Acquisition</i>
CAT	<i>Category o Categoría</i>
CCS	<i>Central Control Facility</i>
CIDEFO	<i>Comisión Interministerial de Defensa y Fomento</i>
CPS	<i>Central Processing Facility</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DH	<i>Decision Height</i>
DME	<i>Distance Measurement Equipment</i>
DTO	<i>Department of Transportation</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EEUU	<i>Estados Unidos</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMEA	<i>Europe Middle East Africa</i>
EOL	<i>End-Of-Life</i>
EPN	<i>European Permanent Network</i>
ERGNS	<i>Red de Estaciones GNSS Permanentes</i>

ESA	<i>European Space Agency</i>
ESSP	<i>European Satellite Services Provider</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
ETSID	<i>Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño</i>
EUREF	<i>European Reference Organization</i>
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FAF	<i>Final Approach Fix</i>
FDE	<i>Fault Detection and Exclusion</i>
FL	<i>Flight Level</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Soutnikovaya Sistema</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPS SV	<i>GPS Space Vehicle</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSA	<i>European Global Navigation Satellite Systems Agency</i>
GSO	<i>Geosynchronous Satellite Orbit</i>
ha	<i>Hectáreas</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
HMI	<i>Hazardous Missed Information</i>
HNSE	<i>Horizontal Navigation System Error</i>
HPE	<i>Horizontal Position Error</i>
HPL	<i>Horizontal Protection Level</i>
HSI	<i>Horizontal Safety Index</i>
IAF	<i>Initial Approach Fix</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAP	<i>Instrument Approach Procedure</i>
IAS	<i>Indicated Airspeed</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
IF	<i>Intermediate Fix</i>
IFR	<i>Instrumental Flight Rules</i>
IGN	<i>Instituto Geográfico Nacional</i>
IGP	<i>Ionospheric Grid Points</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Satellite Orbit</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>

IR	<i>Integrity Risk</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
IVA	<i>Impuesto sobre el Valor Añadido</i>
km	<i>Kilómetros</i>
km/h	<i>Kilómetros por hora</i>
kt	<i>Knots o Nudos</i>
LAAS	<i>Local Area Augmentation System</i>
LNAV	<i>Lateral Navigation</i>
LPV	<i>Localizer Performance with Vertical Guidance</i>
LT	<i>Long Term</i>
m	<i>Metros</i>
MAPt	<i>Missed Approach Point</i>
MCC	<i>Mission Control Centres</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MI	<i>Missed Information</i>
MOC	<i>Minimum Obstacle Clearance</i>
MSAS	<i>Multi-functional Satellite Augmentation System</i>
MSB	<i>Most Significant Bit</i>
NAVIC	<i>NAVigation Indian Constellation</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations</i>
NM	<i>Nautic Miles o Millas Náuticas</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NNSS	<i>Navy Navigation Satellite System</i>
NOTAM	<i>NOtice To AirMen</i>
NPA	<i>Non-Precision Approach</i>
NTRIP	<i>Network Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OAS	<i>Obstacle Assessment Surface</i>
OCA/H	<i>Obstacle Clearance Altitude/Height</i>
OS	<i>Open Service</i>
PACF	<i>Performance Assessment and Check-out Facility</i>
PAG	<i>Programa de Aplicaciones Geodésicas</i>
PBN	<i>Performance Based Navigation</i>
PGM	<i>Program</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PLATA	<i>Plataforma Aérea de Teruel</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
P-RNP	<i>Precise-Required Navigation Performance</i>

PRS	<i>Public Regulated Service</i>
QZS	<i>Quasi-Zenith Satellite</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RDH	<i>Reference Datum Height</i>
RF	<i>Radius to Fix</i>
RIMS	<i>Ranging Monitoring Stations</i>
RINEX	<i>Receiver Marine Electronics Association</i>
RNAV	<i>aRea NAVigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commision for Maritim Services</i>
s	<i>Segundos</i>
S/A	<i>Selective Availability</i>
SAR	<i>Search and Rescue Service</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SID	<i>Standard Instrument Departure Chart</i>
SIS	<i>Signal In Space</i>
SOC	<i>Start Of Climb</i>
SoL	<i>Safety of Life Service</i>
ST	<i>Short Term</i>
STAR	<i>Standard Terminal Arrival Route</i>
TAL	<i>Time to Alert</i>
TAS	<i>True Airspeed</i>
TGD	<i>Retardo ionosférico</i>
TMA	<i>Terminal Maneuvering Area</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UPV	<i>Universidad Politécnica de Valencia</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
V_{at}	<i>Velocidad Indicada en el Umbral o Velocity At Threshold</i>
V_{slg}	<i>Velocidad de pérdida en configuración de aterrizaje</i>
V_{so}	<i>Velocidad de pérdida</i>
VAL	<i>Vertical Alert Limit</i>
VC	<i>Valor de Compra</i>
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>
VNAV	<i>Vertical Navigation</i>
VNSE	<i>Vertical Navigation System Error</i>

VPE	<i>Vertical Position Error</i>
VPL	<i>Vertical Protection Level</i>
VR	<i>Valor Residual</i>
VSI	<i>Vertical Safety Index</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

Introducción General

En el proyecto que se abre a continuación se ha realizado el diseño y validación de una operación de aproximación basada en prestaciones, con mínimos LPV-200, mediante el uso de GNSS y SBAS en el aeropuerto de Teruel. La aeronave empleada para el diseño ha sido un Boeing 747-800. La aproximación se ha diseñado para ambas cabeceras de pista, teniendo formas muy similares entre sí.

Cuando se habla de un proceso de aproximación empleando un sistema de posicionamiento global GNSS, como puede ser GPS o el aún en desarrollo Galileo, se habla de la última tecnología de navegación aérea. Estos sistemas de navegación, no obstante, precisan de sistemas de aumentación que permitan alcanzar los requerimientos establecidos para la operación. En este caso, el sistema más moderno y que se ha empleado en el diseño es el SBAS, concretamente el diseñado por EASA: EGNOS. Las aproximaciones empleando sistemas de navegación por satélite se han implementado casi en su totalidad en Estados Unidos y están comenzando a cobrar más fuerza en Europa.

Para realizar el diseño del proyecto, se ha segmentado en dos partes de acuerdo a su desarrollo y contenido, suponiendo su esencia los grandes retos del presente Trabajo de Fin de Máster.

En la primera parte, se expone todo el proceso de diseño de las operaciones de aproximación a las dos cabeceras de pista. Para dicho diseño, se ha seguido la normativa recogida en la documentación de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Estos documentos son el *Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual* y el *Doc 8168 Aircraft Operations Vol II, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. Ha sido necesaria la creación de programas de Matlab que permiten la visualización de la ruta de forma aproximada, dibujándola en Google Earth.

La segunda parte recoge el proceso de validación de la operación siguiendo los mínimos requeridos y los sistemas a usar. El procedimiento de validación que se sigue en el proyecto es exclusivo para el uso de GNSS y SBAS de forma conjunta. El objetivo del mismo es asegurar el cumplimiento de los requerimientos mínimos para LPV-200. Se encuentran en esta segunda parte todas las etapas de dicho proceso de validación, desarrollándose las pertinentes mediante la obtención de datos y su procesamiento con distintos programas informáticos. De entre todos ellos, destaca PEGASUS, desarrollado por Eurocontrol y gracias al cual se obtienen los resultados del proceso de validación.

La conclusión del proyecto se realiza mediante las conclusiones generales extraídas del mismo, así como el presupuesto de su elaboración, el pliego de condiciones y anexos.

Motivación

La modernización de los sistemas de navegación aérea ha venido de la mano de los sistemas de posicionamiento global o GNSS. No obstante, dichos sistemas por sí mismos no son capaces de ofrecer las prestaciones requeridas para las operaciones en vuelo, por lo que se deben combinar con sistemas de aumentación como SBAS. Gracias al desarrollo de estos sistemas, las radioayudas terrestres no son necesarias para el guiado de las aeronaves.

Actualmente, en Estados Unidos se ha implantado casi en su totalidad la combinación de sistemas GNSS/GBAS y GNSS/SBAS, convirtiéndose en los pioneros en el desarrollo de dichos sistemas, así como en su validación. Europa ha seguido muy de cerca esta evolución, encontrándose actualmente en desarrollo la implantación de dichos servicios. De entre los países que integran la Unión Europea, fueron pioneros Francia, Alemania y Noruega. No obstante, aún hay por delante un largo camino para alcanzar la totalidad de la implementación.

Y dentro de los países que se encuentran a la retaguardia del proceso, se encuentra España. Actualmente, se cuenta con los aeropuertos de Santander, Málaga, Palma de Mallorca y Valencia. Se espera que los grandes aeródromos del país cuenten con el sistema de aproximación en el horizonte 2021, quedando todavía el resto de menor relevancia por implementar.

Como aeródromo de menor relevancia, se encuentra el aeropuerto de Teruel, que, actualmente, no cuenta con ningún tipo de aproximación instrumental. Esto implica que aeronaves como el Boeing 747-800 realizan aproximaciones visuales, ya que el tráfico y la meteorología del aeropuerto así lo permiten. No obstante, al no disponerse de infraestructura en tierra, el desarrollo de una aproximación instrumental que no la precise es de gran interés.

Recogiendo todos los motivos expuestos anteriormente, se encuentra la motivación de la realización del proyecto. Pese a que el aeródromo de Teruel ha sido pionero en el tipo de actividad desarrollada en el mismo y cuenta con modernas instalaciones y servicios, puede mejorarse su calidad introduciendo este tipo de aproximación instrumental, situándolo así a la cabeza de la vanguardia aeronáutica en España. Adicionalmente, la realización del proyecto permite ampliar y reforzar los conocimientos ya trabajados durante el Máster y el Grado, pudiéndose extrapolar aquellos más generales a cualquier otro aeródromo, dando mayor utilidad a la investigación llevada a cabo.

Objetivos

Como objetivo principal del trabajo, se puede establecer el desarrollo y validación de una operación de aproximación al aeropuerto de Teruel para la aeronave Boeing 747-800 o aeronave de diseño del mismo. En dicha aproximación se emplea la última tecnología desarrollada: sistemas de navegación global por satélite o GNSS, conjuntamente con el sistema de aumentación por satélite SBAS.

Se pueden, no obstante, marcar otros objetivos. Uno de ellos es el asentamiento de las bases necesarias para la posterior modernización del aeropuerto de Teruel, ya que actualmente tan sólo emplea aproximaciones de tipo visual y no dispone de infraestructura para aproximaciones instrumentales. Estos hechos dan mayor valor a la implantación de una aproximación instrumental que no precise de dicha infraestructura en tierra.

Gracias a la realización, se ha logrado comprender en mayor profundidad la normativa que rige el diseño de una operación de aproximación de una aeronave. Cabe destacar que la documentación seguida para ello ha sido OACI y los requerimientos empleados son los propios del sistema europeo EGNOS. Más concretamente, los del servicio LPV-200.

Finalmente, el entendimiento de la normativa que se encuentra en desarrollo es también un objetivo importante a remarcar. Ayuda a proyectar la evolución de la misma con la finalidad de abrazar aquellos métodos más modernos que se desarrollen en un futuro, permitiendo la reducción de costes de mantenimiento de radioayudas, así como la reducción de emisiones a la atmósfera y el aumento de la seguridad de las operaciones.

Capítulo 1

Parte I: Diseño de una aproximación PBN basada en GNSS

1.1. Introducción

A lo largo de la primera parte del proyecto, se pretende exponer el desarrollo del proceso de diseño de una aproximación basada en prestaciones o PBN mediante el uso de SBAS/GNSS, concretamente, en el aeropuerto de Teruel. Con mayor concreción, el diseño se ha llevado a cabo haciendo uso del servicio de EGNOS conocido como LPV-200. Dicho servicio es uno de los modelos más novedosos de aproximación en Europa, encontrándose todavía en desarrollo para muchos de los aeropuertos que, en un futuro, operarán haciendo uso del mismo. Pese a la gran exigencia de sus requerimientos, las ventajas proporcionadas son notables.

Para una mejor comprensión del procedimiento de diseño, se ha dividido el primer capítulo del documento en distintos apartados. Se comienza con una descripción general de la situación actual del aeropuerto de Teruel, para continuar con la explicación del tipo de operación que se va a llevar a cabo, así como sus características. Finalmente, se mostrará el desarrollo de la aproximación diseñada para las dos cabeceras de pista del mencionado aeródromo.

Para llevar a cabo el diseño del procedimiento, se ha hecho uso de la documentación específica de OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), más concretamente del *Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual* y el *Doc 8168 Aircraft Operations Vol II, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. Con ello, se podrá realizar la descripción del diseño y construcción del procedimiento de aproximación, tanto a la pista 12 como a la 30, de proceso análogo.

Como cierre del primer capítulo del documento, se presentan las conclusiones de esta primera parte para, de este modo, proseguir con el segundo capítulo que conforma este Trabajo de Fin de Máster.

1.2. Aeropuerto de Teruel

1.2.1. Descripción

El aeropuerto de Teruel fue declarado oficialmente como abierto al tráfico civil en febrero del año 2013, convirtiéndose en el *hub* industrial aeronáutico a nivel internacional situado cerca del centro de la industria aeroespacial europea: Toulouse. Se conoce como la plataforma aeroportuaria de Teruel, PLATA. Su situación es estratégica a nivel industrial, ya que se encuentra en el centro de grandes ciudades como Madrid, Barcelona, Valencia, Zaragoza y Bilbao, reuniendo estas el 60 % del PIB español y más de 20 millones de habitantes en un radio de 400 km. Además, la provincia es de interés turístico debido a su orografía, paisajes, poblaciones y actividades durante la temporada de invierno, entre otros. Cuenta también con una red de carreteras moderna, como la Autovía Mudéjar que une Valencia - Teruel - Huesca - Somport. Como ya se ha mencionado, al encontrarse cerca de Toulouse, se convierte en un *hub* internacional a nivel industrial y, por su parte, su cercanía con Valencia y Castellón lo convierte en una frontera abierta entre Castilla y el Mediterráneo.

Además, PLATA, pertenece al consorcio formado por el Gobierno de Aragón y el Ayuntamiento de Teruel, lo que hace que se trate de un aeropuerto no gestionado por AENA. Se concibe como una plataforma abierta donde empresas aeronáuticas de todo el mundo pueden establecer sus operaciones en una localización estratégica y bajo condiciones de operatividad altamente competitivas. Actualmente, se trata de un espacio reservado al mantenimiento, almacenaje y reciclaje de aviones, helicópteros, aeronaves de fuselaje ancho, aviación ejecutiva y general y UAV-RPA. Adicionalmente, presenta un espacio reservado a investigación, desarrollo y actividades aeroespaciales.

Al tratarse de un aeropuerto joven, presenta una infraestructura moderna y flexible, lo que le permite funcionar tanto en operaciones de carga como de transporte de pasajeros, aunque, actualmente, esta última no esté activa.

Su código IATA es TEV y su código OACI es LETL, la L hace referencia a su situación en el la zona geográfica que abarca el sur de Europa, Israel y Turquía. La E hace referencia a España y TL se reserva al aeropuerto.

La ciudad de Teruel, capital de provincia de Aragón, cuenta con una población de 35484 habitantes en 2017, encontrándose su aeropuerto a una distancia de entre 10 y 12 km del centro de la misma. Las carreteras que permiten el acceso al mismo son la nacional N-234 y la ya mencionada Autovía Mudéjar, A-23. En las Imágenes 1.1, 1.2 y 1.3 se puede apreciar tanto la situación geográfica de la ciudad, como la de su aeropuerto.

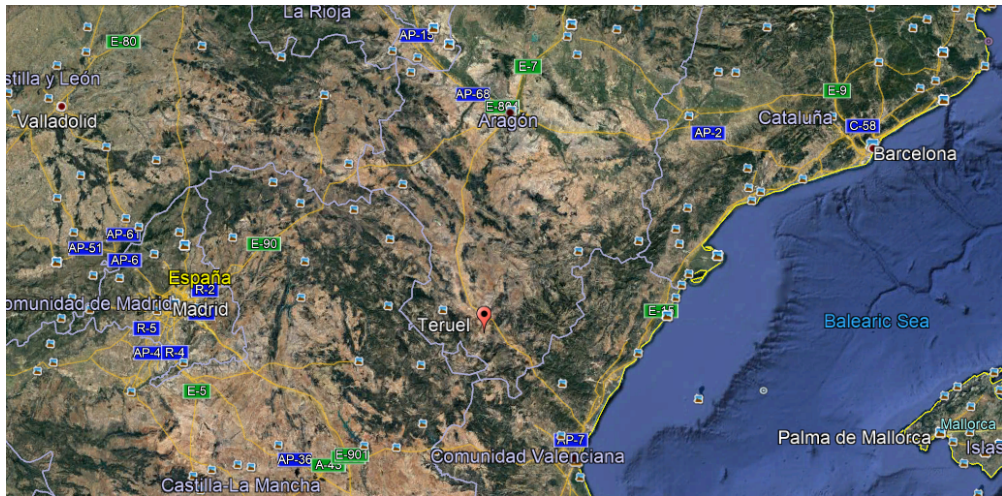


Figura 1.1: Ubicación de la ciudad de Teruel

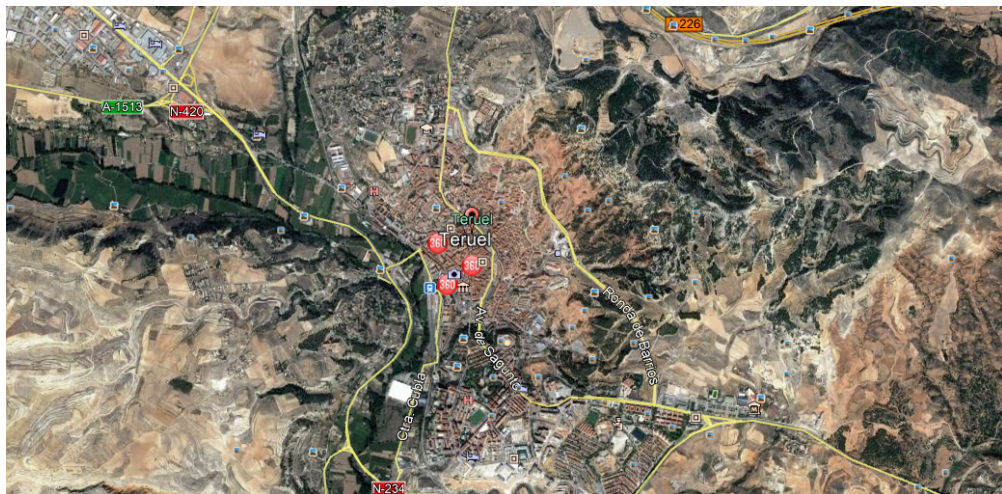


Figura 1.2: Detalle ubicación de la ciudad de Teruel



Figura 1.3: Ubicación del aeropuerto de Teruel

Se puede observar que el aeropuerto de Teruel cuenta con una única pista de orientación 18/36 de 2825 x 45 m. Su elevación de referencia es 1026 m, su temperatura de referencia 31° y opera con horario diurno exclusivamente, salvo vuelos nocturnos bajo demanda desde finales de 2017.

Las infraestructuras con las que cuenta el aeropuerto de Teruel son las siguientes:

- 1 pista.
- 1 terminal.
 - Parking gratuito.
 - Torre de control.
 - Sala de operaciones y meteorología.
- 1 plataforma de aeronaves de 30 ha.
- 1 plataforma de estacionamiento de 120 hectáreas.
- Zona industrial de 33 ha. para la implantación de empresas.
- 1 hangar de mantenimiento de aeronaves Boeing 747.
- 1 hangar de pintura para aviones Boeing 747.

- Área de aviación ejecutiva.
- Plataforma de estacionamiento de helicópteros.
- Área de reciclado de aviones.
- Tanques de combustible.
- Banco de pruebas español privado de motores de combustible líquido.

Dado que el aeropuerto de Teruel no está abierto al tráfico de pasajeros todavía, no existe movimiento en este aspecto. No obstante, en el año 2017 se registraron 4150 operaciones, suponiendo un crecimiento del 116 % con respecto a 2016. Al no tratarse de un aeropuerto de transporte de pasajeros, su carácter no es estacional.

1.2.2. Historia del Aeropuerto

La historia del aeropuerto de Teruel se remonta a la Guerra Civil española.

En el emplazamiento del actual aeropuerto se situaba el antiguo aeródromo de Caudé, empleado durante la Guerra Civil (1936 a 1939). Finalizada esta, el aeródromo pasó a utilizarse como Polígono de tiro para el ejército del aire español. En ese momento, la superficie abarcada por el mismo era de 2043600 m^2 .

El uso histórico de este enclave para la realización de actividades aeronáuticas con fines militares encontraba su motivo en las condiciones climatológicas y localización. Además, como otra ventaja altamente valorada para la naturaleza de sus actividades, se encuentra el hecho de presentar una baja densidad de tráfico aéreo. Al tratarse de un enclave militar, la información al respecto es muy reducida. No obstante, en la Imagen 1.4 se muestra una aproximación de lo que sería el antiguo aeródromo, mencionando que la carretera en el croquis se encuentra a la derecha en vez de a la izquierda del mismo.

No fue, no obstante, hasta el año 2009 cuando cesaron las actividades que en él llevaba a cabo el ejército del aire español. En este momento, el aeródromo pasó a manos del Gobierno de Aragón. Tras sopesar el éxito de la construcción de un aeródromo de carácter civil, en marzo del mismo año se comienzan las obras de la plataforma aeroportuaria que se destinaría a actividades de naturaleza industrial. En julio comenzaron, también, las obras del ramal ferroviario que conectaría el aeropuerto con sus usuarios. Para finalizar la actividad llevada a cabo durante el año 2009, el 15 de noviembre se concluyeron las obras de explanación y asfaltado parcial de la pista.

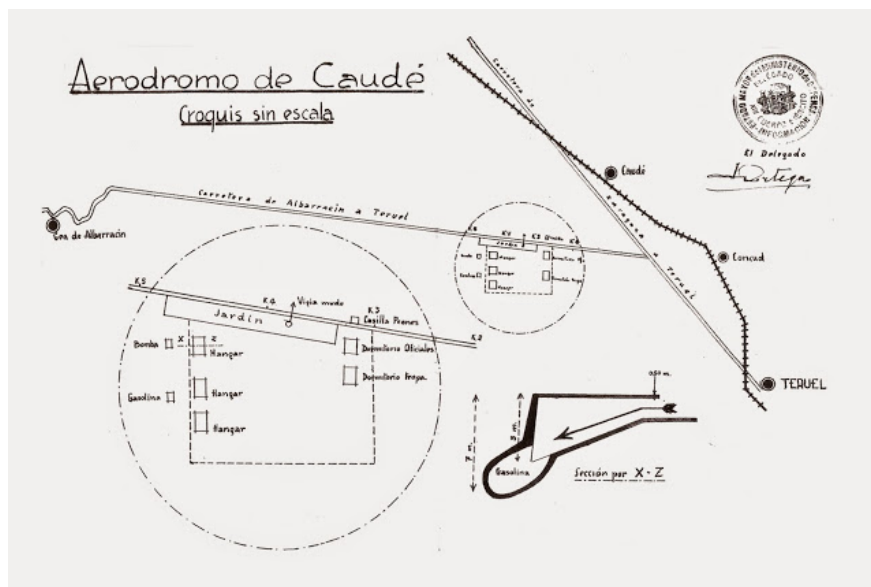


Figura 1.4: Croquis del antiguo aeródromo militar de Caudé

No es hasta mediados de marzo de 2010 cuando se comienza con el hormigonado del área de mantenimiento y la obra civil del aeropuerto no finalizó hasta el 19 de septiembre del mismo año. De nuevo, el 15 de marzo de 2011 empieza la construcción del hangar, que no finaliza hasta el 1 de marzo del año siguiente.

Una vez finalizada la obra del aeropuerto, el 30 de octubre de 2013, éste está listo para recibir al primer avión de fuselaje ancho: un Boeing 747-400. La aeronave procedía de Frankfurt am Main, Alemania, aterrizando en el aeropuerto a las 3 de la tarde. De este modo, comienza el tráfico de aeronaves en el aeropuerto, destinado al estacionamiento de larga estancia, tal y como se ha mencionado en la Sección 1.2.1. Además, el 30 de octubre del mismo año tiene lugar el congreso UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), que también se emplaza en el Palacio de Exposiciones y Congresos de la capital de provincia. En dicho congreso tuvieron lugares demostraciones de vuelo de los distintos modelos presentados, así como la presentación de la Asociación Española de Sistemas Aéreos.

Continuando con los hitos que conforman la historia del aeropuerto de Teruel, el 11 de marzo de 2014 comienza la pavimentación de la campa de estacionamiento de larga estancia, aumentando la capacidad de almacenaje del aeropuerto. También, el 17 de julio de 2014 llegan los primeros helicópteros de salvamento del 112 y forestales. Cerrando este año se encuentra el aterrizaje del Airbus A330 procedente de Dallas, Estados Unidos, el 24 de septiembre. Éste vuelo supone el primer aterrizaje de una aeronave no Schengen. El aeropuerto, que hasta entonces ha estado realizando tareas de mantenimiento durante el estacionamiento de larga duración en sus instalaciones, está regido por la empresa Tarmac Aragón, filial del

grupo Airbus. Dicha empresa posee la concesión del Aeropuerto durante los próximos 25 años a contar desde el mencionado en este párrafo.

Comenzando el año 2015, se inicia la obra y puesta en marcha de la plataforma de combustible del aeropuerto. En septiembre del mismo año tiene lugar, además, un curso de entrenamiento de transporte aéreo táctico avanzado, poniendo de relieve la rentabilidad del aeropuerto industrial. El 24 de octubre se registra un pico de actividad en el aeródromo, acogiendo a 24 aeronaves en un solo fin de semana. El cierre del año lo protagoniza el otorgamiento del Premio Revelación 2015 de Actualidad Económica.

El año 2016 se inicia con el estacionamiento total máximo anual de 84 aeronaves y con los ensayos del Airbus A400M, una aeronave militar de largo alcance y avión cisterna propulsado por 4 motores turbohélice. En junio de este año, se inicia y finaliza la pavimentación de la segunda fase de la pista. En julio recibe la visita de la Vicepresidenta del Gobierno de España, Soraya Sáenz de Santamaría. En septiembre se inaugura, también, la escuela de vuelo y el año cierra con el vial asfaltado de la zona de hangares y la recepción del Sello de Responsabilidad Social de Aragón para el año 2017.

La situación actual del aeródromo se ha descrito en la Sección 1.2.1.

1.2.3. Geografía y clima

Teruel se encuentra en la parte oriental de la península ibérica y es la provincia de menor tamaño de la comunidad de Aragón. Se integra de 236 municipios y se encuentra al sur de la comunidad, lindando al norte con Zaragoza a la que se une mediante el sistema ibérico y la depresión del Ebro; al oeste con los Montes Universales y la sierra Menera ejerciendo frontera con Castilla la Mancha (Cuenca y Guadalajara); con la Comunidad Valenciana (Valencia y Castellón) al sur y al este, prolongándose el sistema ibérico hasta el Mediterráneo; y al noroeste con Cataluña, concretamente con la provincia de Tarragona, sirviendo los Puertos de Beceite actúan como nexo entre el sistema ibérico y la Cordillera Costero-Catalana. Esto implica que la provincia tenga una extensión muy montañosa.

Las unidades de relieve fundamentales en el territorio de la provincia son el macizo de Albarracín, las sierras de Gúdar y Javalambre, la depresión del alto Jiloca, la depresión de Teruel y el somontano del Bajo Aragón. Se resumen a continuación sus características, así como los materiales que se pueden encontrar en ellas.

- **Macizo de Albarracín:** Enlaza con las sierras de Guadalajara y se conforma por varias sierras separadas entre sí. Los materiales dominantes son paleozoicos, fractura-

dos por el plegamiento alpino y erosionados diferencialmente, provocando la aparición de crestas cuarcíticas, junto a valles erosivos excavados sobre las pizarras de menor resistencia. La altura máxima la alcanza el pico Caimodorro, con 1921 m. Destacan las sierras de Carbonera, Collado de la Plata y Tremedal. También aparecen extensas llanuras en las zonas situadas hacia el noreste.

- **Macizo de Javalambre:** Se encuentra en el ángulo suboriental de la provincia, constituido por la sierra de idéntico nombre y la de Camarena. Se compone de sedimentaciones mesoterciarias, presentando páramos erosionados por la acción de los ríos. Su altura máxima está en el pico Javalambre a 2020 m.
- **Macizo de Gúdar-Maestrazgo:** Se encuentra en el sureste de la provincia, separado del de Javalambre por la depresión del río Mijares. La erosión fluvial rejuvenece el terreno y sitúa la superficie por encima de los 1200m. La litología y morfología es similar a la del macizo de Javalambre. El municipio más alto de la península se encuentra en esta sierra: Valdelinares, así como el pico Peñarroya con 2024 m.
- **Depresión del Jiloca:** De longitud de 60 km y 14 de anchura, con origen en una fosa tectónica fallada, colmada de materiales de elevado interés agrícola.
- **Depresión de Teruel:** Sobre los valles fluviales del Alfambra, Guadalaviar y Turia, alcanza una longitud de 70 km. Existen pequeñas plataformas estructurales de talud arcilloso o margoso muy abarrancado, cubiertos por una cornisa calcárea de aspecto similar a de las muelas del centro de la depresión del Ebro.
- **Somontano del Bajo Aragón:** Se trata de una continuidad del espacio propio de la depresión del Ebro. Presenta yesos al norte de la sierra de Arcos y conglomerados al norte de las sierras de Andorra y Calanda. En el extremo oriental de la provincia, hay estructuras tabulares en las series de conglomerados y areniscas del borde de cuenca.

El clima de la provincia es peculiar, debido al aislamiento de las influencias marinas creado por el relieve y altitud de la misma. Conviven climas mediterráneos, de montaña media y de fuerte matiz continental. Las regiones más elevadas registran precipitaciones de 500-600, superándose los 1000 mm en las zonas mejor orientadas, como Gúdar y Albarracín. Las temperaturas medias se encuentran por debajo de los 10 °, con abundantes nevadas y periodos con posibilidad de helada de hasta 8 meses. Las mínimas se sitúan por debajo de los 15° negativos, habiéndose alcanzado mínimas absolutas de hasta 30° bajo cero. Los veranos son suaves con valores medios mensuales entre 17° y 20°.

No obstante, en las depresiones internas y altiplanicies centrales, se registran 500-600 mm en cuanto a precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 10° y 13°, con valores

de 20-25° para el mes más cálido y de 0-5° para el mes más frío. Las diferencias térmicas pueden alcanzar los 20° en pocas horas por la combinación de las condiciones de sequedad y altura.

1.2.4. Espacios aeronáuticos

Siguiendo el Anexo 11 de la OACI, cuyo título es "Servicios de Tránsito Aéreo", el espacio aéreo español se clasifica en distintos niveles. Dichos niveles son 7 y se designan con una letra que va de la A a la G. Más concretamente, las letras que van de la A a la E se emplean para hacer referencia al espacio aéreo controlado. Por su parte, las letras F y G se refieren al espacio aéreo no controlado.

El espacio aéreo controlado es aquel que proporciona servicio de control del tráfico aéreo, ya bien se trate de vuelos instrumentales o IFR (*Instrumental Flight Rules*) o visuales, también llamados VFR (*Visual Flight Rules*). Este espacio tiene ciertas reglas y requerimientos que se deben cumplir para poder volar en él.

Teruel pertenece al FIR/UIR de Madrid y el aeropuerto presenta un espacio aéreo de clase G, es decir, espacio aéreo no controlado. Si se vuela a FL60 o inferior, se encontrará en dicho espacio aéreo no regulado. No obstante, si se vuela por encima de dicho nivel, se encontrará bajo jurisdicción de Madrid ACC.

La Zona de Tránsito de Aeródromo (ATZ), se denomina Teruel ATZ y está delimitada por un cilindro de 5 NM de radio centrado en el punto de referencia del aeródromo (ARP). No hay servicio de control proporcionado por el aeropuerto y los únicos vuelos que tienen lugar en él son de tipo VFR. Las únicas comunicaciones de tipo ATS existentes en el aeropuerto son del tipo Aire-Aire. La regulación propia del aeródromo exige que los vuelos VFR mantengan, exclusivamente, escucha en la frecuencia 122.675 MHz y transmisión en esta misma frecuencia de sus intenciones, así como de la evolución de las distintas fases de su vuelo. De este modo, se pretende que las aeronaves puedan conocer la situación de tránsito del aeródromo. La finalidad de este hecho es que se mantenga la separación apropiada, si procede. Ninguna estación aeronáutica del aeropuerto responderá o acusará del recibo de las radiocomunicaciones.

Teruel se encuentra afectada por la Zona Peligrosa denominada LED104 (Teruel). Esta zona, limitada por los niveles de vuelo FL100 y FL460, se destina al entrenamiento de unidades aéreas y ejercicio de reabastecimiento en vuelo y opera de 6 a 24 horas, en verano de 5 a 23 horas. La actividad se anuncia por NOTAM.

1.2.5. Actividades en el aeropuerto

El aeropuerto de Teruel es, como ya se ha mencionado, un aeropuerto de tipo industrial con actividades de esta naturaleza. A diferencia de los aeropuertos destinados al tráfico de pasajeros, las actividades que allí tienen lugar son de distinta índole. Se procede a enumerar y a describir brevemente dichas actividades, así como las empresas que las desarrollan.

Las actividades desarrolladas en el aeropuerto son:

- **Estacionamiento de larga estancia de aeronaves:** Presenta capacidad para 400 grandes aeronaves y buenas condiciones climatológicas para su preservación.
- **Mantenimiento de aeronaves comerciales:** Los aviones que van a recibir este servicio se sitúan en la campa y se desplazan a los hangares para ser atendidos. Uno de los hangares puede albergar un B747 y, el otro tiene capacidad para aeronaves de tamaño similar a un A320.
- **Reciclado y desmantelamientos de aeronaves:** Actividad desarrollada en una plataforma habilitada y situada detrás de los hangares.
- **Base de helicópteros medicalizados:** Durante todos los días del año, el Servicio Aéreo de Transporte Sanitario y Emergencias del 112 opera en el aeropuerto. Tienen hangar propio junto a la plataforma de estacionamiento de actividades de mantenimiento, así como zona de estacionamiento y tanque de combustible.
- **Escuela de pilotos comerciales de aviación:** En dicha escuela se imparte formación de entrenamiento de vuelo integrado de pilotos comerciales.
- **I+D en el Sector Aeroespacial:** Incluye el desarrollo de tecnologías como RPAS/UAVS, aproximaciones instrumentales por satélite, sistemas automáticos de meteorología, etc.
- **Banco de pruebas de motores:** Existen varios bancos de pruebas de motores cohete con combustible líquido, desarrollado y empleado en colaboración con la ESA.
- **Suministro de combustible de aeronaves:** Garantiza el servicio de combustible de aviación JET A1 y AVGAS en las plataformas de repostaje.
- **Centro de excelencia para RPAS (UAVS):** Se llevan a cabo pruebas en el aeropuerto y ensayos para prototipos de nueva implantación y certificación, así como segregación de espacio temporal para pruebas con CIDEFO, AESA o ENAIRE. También se organizan congresos y cursos especializados, proyectos de desarrollo de RPAS con nuevas tecnologías.

- **Aviación General:** Actividad que engloba todas las operaciones de aviación civil, excluyendo los servicios aéreos regulares y operaciones no regulares de transporte aéreo por remuneración o arrendamiento, como escuelas de vuelo o trabajos de aviación privada.
- **Trabajos aéreos:** Operación comercial que emplea la aeronave para realizar operaciones especializadas de agricultura, construcción o fotografía, entre otras.
- **Pruebas de aeronaves:** Como pruebas de motores.
- **Base de operaciones y mantenimiento para aviación ejecutiva:** Con espacios y personal técnico especializado para esta función.
- **Pintura y acondicionamiento de aeronaves.**
- **Transporte militar y ejército del aire:** Cursos de entrenamiento de transporte táctico avanzado en colaboración con la Base Aérea de Zaragoza y la Agencia de Defensa Europea.
- **Otros: desarrollo de prototipos, fabricación y ensamblaje aeroespacial.**

Las empresas que hacen uso del aeropuerto para llevar a cabo estas actividades son las que se mencionan a continuación:

- *Tarmac Aerosave:* Filial de Airbus dedicada al estacionamiento, mantenimiento y reciclaje de aeronaves.
- *Habock Aviation:* Servicio Aéreo de Transporte Sanitario y Emergencias del 112 posee un hangar para actividades de estacionamiento y mantenimiento, así como un tanque de combustible propio.
- *Flying Time Aviation:* Academia británica de entrenamiento de vuelo integrado.
- *Elson Space Engineering:* Dedicada a la investigación de habilidades, desarrollo, ingeniería, logística y gestión de proyectos. Emplean las instalaciones que disponen en el aeropuerto de Teruel para la investigación mediante pruebas y operaciones.
- *PLD Space:* Empresa de creación española dedicada a la facilitación al acceso comercial y científico al espacio.
- *BP Oil España:* Se encarga del suministro de JET A1 y AVGAS.
- *Delsat Aeronautics:* Ofrece servicios profesionales con Drones RPAS para actividades como seguridad vigilancia, trabajos técnicos y científicos, análisis de infraestructuras y edificios, etc.

- *Pulsar Space*: Empresa que desarrolla y explota tecnología basada en la observación y análisis del Planeta Tierra.
- *Singular Aircraft*: Empresa que se dedica a aportar soluciones a pilotos que ponen en riesgo su vida en operaciones aéreas. Actualmente, trabaja ofreciendo soluciones para trabajos de extinción de incendios, transporte de mercancías, vigilancia o labores agrícolas.

Su ubicación, cerca de grandes centros económicos como Madrid, Barcelona, Valencia, Zaragoza y Bilbao, así como del puerto de Sagunto, lo convierte en un lugar idóneo para la carga y descarga de mercancías. Por otro lado, se emplean sus instalaciones para el rodaje de anuncios.

1.2.6. Flota usuaria

El aeropuerto de Teruel posee puestos de estacionamiento para aeronaves del tipo B747 y A320, por lo que se pueden considerar como flota usuaria principal del aeródromo. Al no tratarse de aviones cuyo uso se destine, en este caso, al transporte de pasajeros, no resulta de interés considerar su capacidad de albergar personas en su interior. En el desarrollo del proyecto se trabajará con la aeronave Boeing 747-800, cuyas dimensiones y características se tratarán en la sección 1.3.1.

No obstante, también hacen uso del mismo helicópteros de salvamento medicalizados del 112, aunque no son de interés para la realización del proyecto.

La aviación ejecutiva también tiene un hueco reservado en este aeropuerto, como ya se ha mencionado en la Sección 1.3.

1.3. Descripción de las principales aeronaves usuarias del aeropuerto

1.3.1. Descripción del avión Boeing 747

En esta sección se va a realizar una descripción más detallada del Boeing 747-800 elegido para el desarrollo del proyecto. La Imagen 1.5 muestra a la mencionada aeronave. Se trata del avión comercial más grande construido en Estados Unidos.



Figura 1.5: Aeronave Boeing 747-800

El Boeing 747-800 es la sexta generación del Boeing 747. Su desarrollo parte del Boeing 747-400, habiéndose alargado su fuselaje en 5.65 metros. También presenta una versión mejorada de las alas que aumenta su eficiencia.

Es una aeronave cuatrimotor y presenta la peculiaridad de no tener *winglets* al final de las alas. Al haber aumentado la envergadura de estas, la aeronave pasa de clasificarse como categoría F en vez de E, como su predecesora.

Se recoge en la Imagen 1.6 el diseño de la misma, así como las medidas más importantes en las vistas de planta, alzado y perfil. Su longitud total es de 76.25 metros y su envergadura, es de 68.4 metros. En cuanto a la anchura del fuselaje es de 6.5 metros, como se puede observar en el plano ya mencionado. Finalmente, la distancia externa del tren de aterrizaje es de 11 metros.

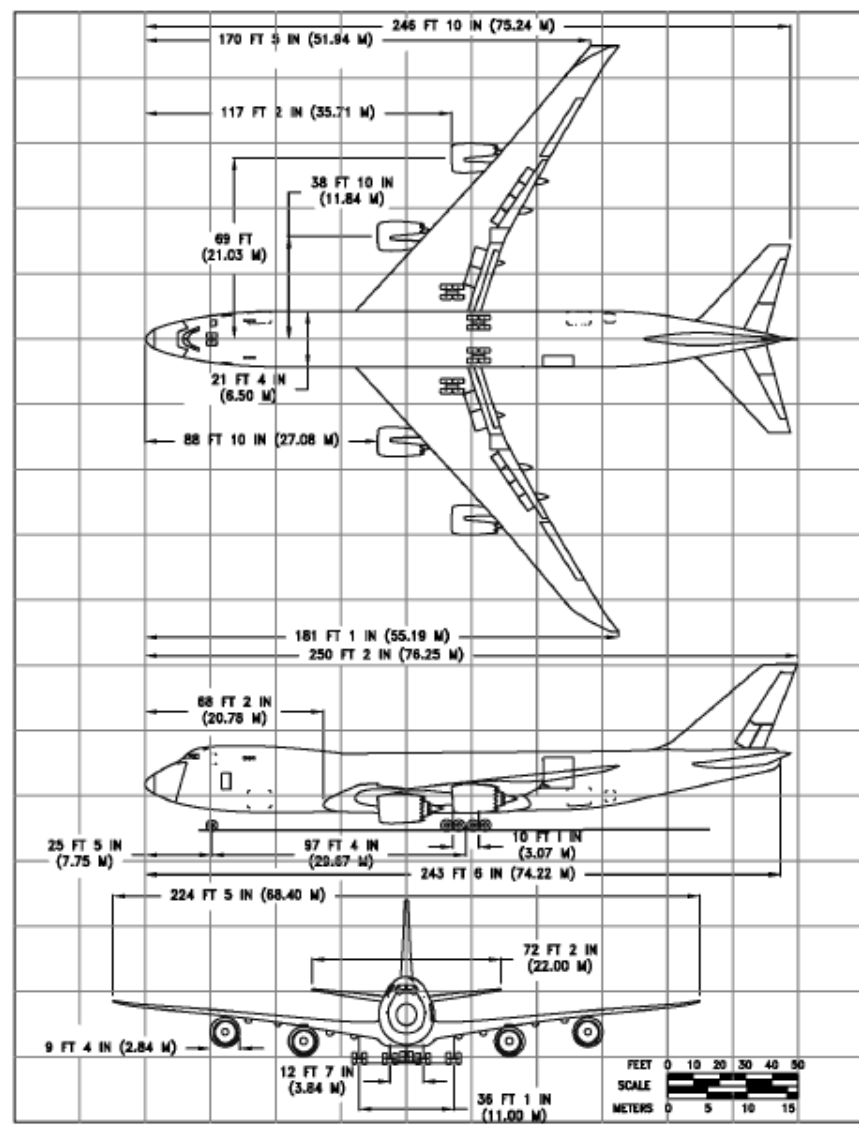


Figura 1.6: Planta, alzado y perfil del Boeing 747-800

El modelo Boeing 747-800 incorpora tecnología más moderna que la de su predecesor, haciéndolo más versátil en cuanto a navegación aérea. Por ejemplo, incluye la tecnología *fly-by-wire* en la mayoría de controles laterales. Además, la mayor capacidad de sus alas para almacenar combustible, permite no cambiar el estabilizador horizontal para almacenar el combustible auxiliar, ahorrando así costos. También incluye en su fuselaje fibra de carbono, lo que le permite reducir peso.

No obstante, lo más destacable de esta aeronave es la capacidad para navegar con SBAS, a diferencia de su antecesor, incapaz de ello.

Como se explicará más adelante, en el Capítulo 2, SBAS es el sistema de aumentación

basado en satélites que permite el uso de una constelación GNSS para llevar a cabo la navegación aérea. Para ello, se deben incorporar un determinado número de satélites geo-estacionarios que permitan el cumplimiento de los requerimientos exigidos. La ruta que se va a diseñar y validar en el presente proyecto emplea este sistema de aumentación, más concretamente el servicio LPV-200, aún en desarrollo, que ofrece EGNOS, el SBAS europeo.

También es importante incluir las actuaciones de la aeronave así como sus características generales. Todo ello viene incluido en la Tabla 1.1.

Características Generales	
Tripulación	2
Capacidad (pasajeros)	467
Capacidad carga (kg)	873.70
Longitud (m)	76.25
Envergadura (m)	68.40
Anchura (m)	6.50
Altura (m)	19.51
Superficie alar (m^2)	554
Aspect Ratio	8.45
Peso en vacío (kg)	197131
Máximo Peso en Despegue (kg)	447696
Capacidad combustible (kg)	181536
Carga de pago típica (kg)	693
Motores	4
Performance	
Velocidad de crucero (km/h)	917 (B747-8i)/908 (B747-8F)
Alcance (km)	15000 (B747-8i)/8288 (B747-8F)
Techo de servicio (m)	13000

Tabla 1.1: Características y actuaciones del B 747-800

De este modo, se puede afirmar que la aeronave descrita en la presente sección es idónea para realizar los vuelos que tomarán la aproximación diseñada.

1.3.2. Descripción del avión Airbus A320

En esta sección se va a realizar una descripción más detallada del Airbus A320-200 neo elegido para el desarrollo del proyecto. La Imagen 1.7 muestra a la mencionada aeronave.



Figura 1.7: Aeronave Airbus A320-200neo

El Airbus a 320-200neo es la nueva generación de la familia A320 de Airbus. Se distingue, principalmente, de sus antecesores en los motores. Este modelo está funcionando desde el año 2016.

Es una aeronave bimotor que se distingue de las versiones anteriores en su planta motriz. Los nuevos motores son más eficientes y permiten reducir el consumo de la aeronave en hasta un 16 %, incrementando así su autonomía en unos 950 km o bien su capacidad de transporte de carga (hasta 2 toneladas). También ha modernizado el dispositivo de punta alar, sustituyendo el clásico *winglet* por un *sharklet*. Estos dispositivos permiten también reducir el consumo en un 3.5 % y aumentar la carga en 500 kg o la autonomía en 100 millas náuticas.

Se recoge en las Imágenes 1.8 y 1.9 el diseño de la misma, así como las medidas más importantes en las vistas de planta, alzado y perfil.

El modelo A320-200neo incorpora tecnología más moderna que la de su predecesor, haciéndolo más versátil. Los cambios incluidos ya se han comentado, no obstante es destacable la capacidad de navegar haciendo uso de la tecnología SBAS.

También es importante incluir las actuaciones de la aeronave así como sus características generales. Todo ello viene incluido en la Tabla 1.2.

Características Generales	
Tripulación	2
Capacidad (pasajeros)	195
Capacidad carga (m^3)	51.70
Longitud (m)	37.57
Envergadura (m)	35.80
Anchura (m)	3.95
Altura (m)	12.45
Superficie alar (m^2)	124
Peso en vacío (kg)	48500
Máximo Peso en Despegue (kg)	75000
Capacidad combustible (kg)	23282
Motores	2
Performance	
Velocidad de crucero (km/h)	917 (B747-8i)/908 (B747-8F)
Alcance (km)	6100
Techo de servicio (m)	12500
Distancia de despegue	2100

Tabla 1.2: Características y actuación del Airbus A320-200neo

De este modo, se puede afirmar que la aeronave descrita en la presente sección es idónea para realizar los vuelos que tomarán la aproximación diseñada.

1.4. Navegación Basada en Prestaciones (PBN)

1.4.1. Descripción

El concepto PBN especifica que los resultados de *performance* de los sistemas RNAV o RNP de las aeronaves se definan en función de la precisión, integridad, continuidad y funcionalidad necesarias para las operaciones propuestas en espacio aéreo particular. El concepto PBN supone un cambio de navegación basada en sensores a navegación basada en la *performance*.

En este sentido, una especificación para la navegación es un conjunto de requisitos relativos a la aeronave y tripulación de vuelo necesarios para dar apoyo a una aplicación de navegación para un determinado contexto. Dicha especificación define el rendimiento requerido del sistema RNAV o RNP, así como todos los requisitos funcionales (capacidad de realizar procedimientos de trayectoria curva o volar por rutas paralelas desplazadas). Existen dos especificaciones:

- **RNAV (*aRea NAVigation*):** Navegación basada en la navegación de área que no incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo. Permite a las aeronaves elegir cualquier ruta dentro de una red de balizas de navegación, de cuya posición es independiente. Se designa por el prefijo RNAV seguido del nivel de precisión lateral durante el 95 % del tiempo de vuelo (en NM). Existe RNAV en 2D (horizontal), 3D (horizontal y vertical) y 4D, que añade el tiempo a RNAV 3D.
- **RNP (*Required Navigation Performance*):** Especificación para la navegación de área que incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo. Se designa por medio del prefijo RNP seguido del grado de precisión lateral durante el 95 % del tiempo de vuelo e integridad requerida (en NM).

Es importante saber que RNP fue sustituido por el concepto PBN cuando éste se introdujo tras la decimoprimer Conferencia de Navegación Aérea de 2004. Los beneficios de la navegación basada en requerimientos son:

- Reducción de la necesidad de mantener rutas y procedimientos en función de sensores específicos, y los costos conexos.
- Evita el desarrollo de operaciones en función de los sensores cada vez que evolucionan los sistemas de navegación, lo que podría ser un costo prohibitivo.
- Uso más eficiente del espacio aéreo (rutas, ahorro de combustible y reducción de ruido).
- Aclara la forma en que se usan los sistemas RNAV y RNP.

- Facilita el proceso de aprobación operacional de los explotadores proporcionando un conjunto limitado de especificaciones para la navegación previstas para uso mundial.

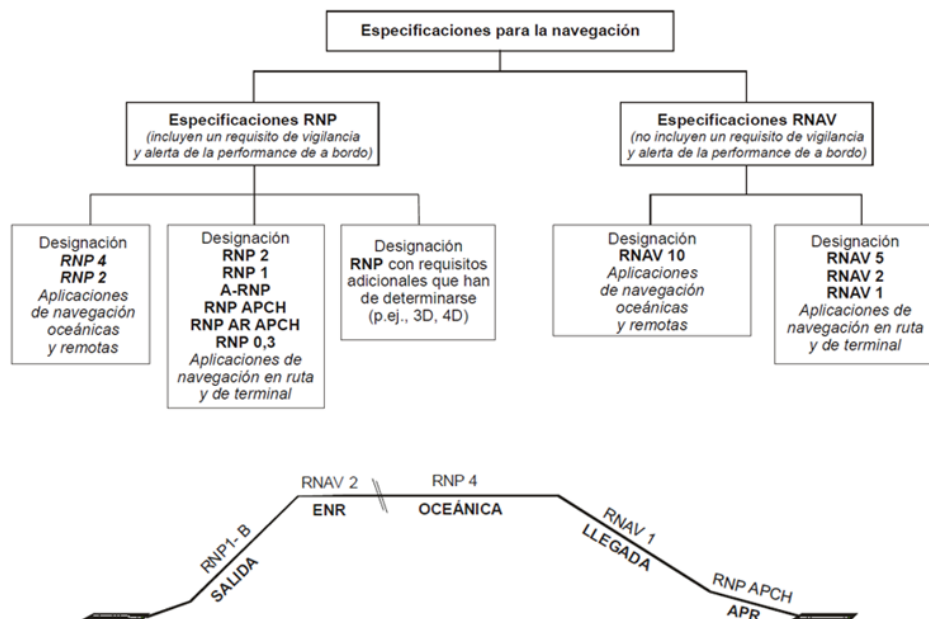


Figura 1.10: RNP y RNAV según fases de vuelo

También se debe tener en cuenta que los requerimientos PBN se ven afectados por las comunicaciones, vigilancia ATS, servicios ATM, infraestructura de ayudas a la navegación y capacidades funcionales y operacionales necesarias para cumplir las especificaciones de navegación. Esto es, requisitos para la aeronave y tripulación a bordo.

A grandes rasgos, las operaciones PBN pueden ser de no precisión o con guiado vertical, pero su principal característica es la de no emplear los procedimientos convencionales y sus sistemas de radioayudas. La Imagen 1.11 muestra la clasificación de las mismas.

Tanto las operaciones PBN como las RNAV aumentan la precisión de las prestaciones de navegación, haciéndola más predecible y, por tanto, permitiendo una mejora en la seguridad y optimización del uso del espacio aéreo, de ahí su gran importancia en la actualidad.

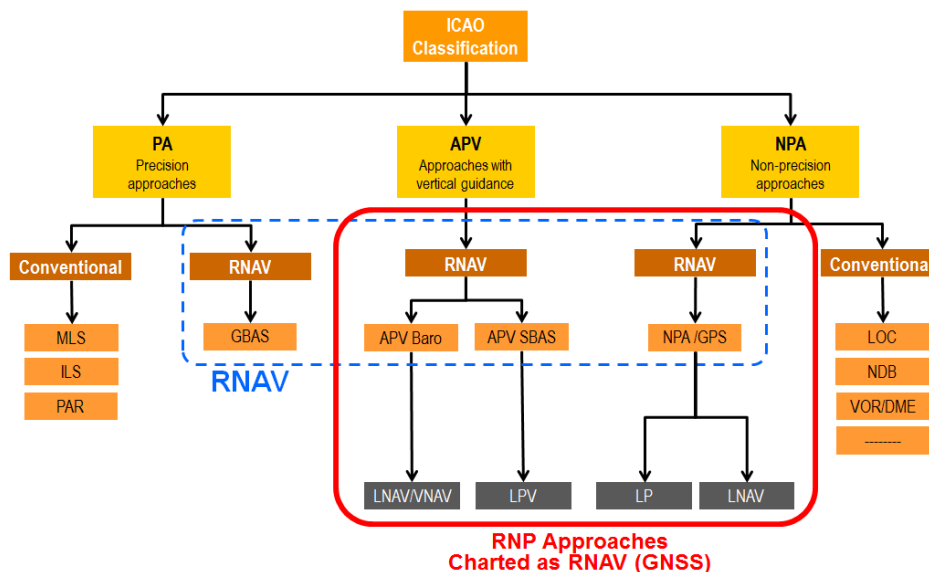


Figura 1.11: Clasificación de operaciones de OACI

1.4.2. Operaciones PBN

Tras la trigésimo sexta asamblea de OACI de octubre de 2007, se llegó a la resolución A36-23, que pedía a los estados miembros la publicación de un plan de implementación para operaciones PBN que incluyese las fases de en ruta, terminal y aproximación. También se requería la publicación de APV (*Approach with Vertical guidance*) en cada pista instrumental para 2016. Esto suponía una mejora de la seguridad en operaciones de aproximación.

Por otro lado, en la trigésimo séptima asamblea de octubre de 2010, la resolución alcanzada (A37-11) requería, por un lado, la implementación de APV en todas las pistas instrumentales. También estableció unos objetivos temporales para alcanzar el 30% de dicha implantación en 2010, el 70% en 2014 y el 100% en 2016, lo que aún no ha sido posible. Las excepciones que permitían únicamente la implantación de LNAV debían incluir aeropuertos que no presentasen altímetro disponible o casos en los que la aeronave no estuviese equipada para procedimientos APV.

De este modo, se establecieron las especificaciones mostradas en la Imagen 1.12 para las diferentes fases de vuelo.

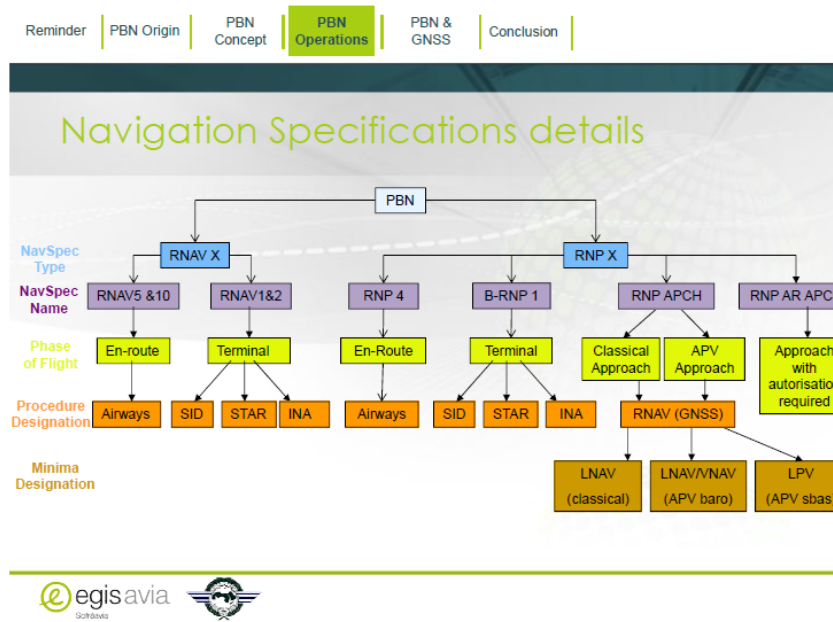


Figura 1.12: Especificaciones PBN

Cuya focalización en las aproximaciones se recoge en la Imagen 1.13.

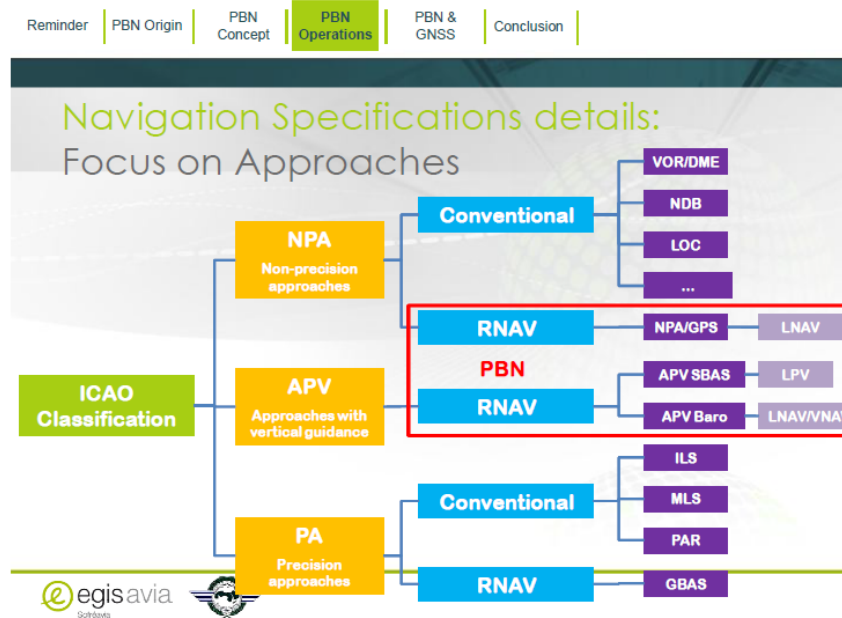


Figura 1.13: Especificaciones PBN en aproximación

También resulta de interés el guiado vertical, mostrado en la Imagen 1.14.

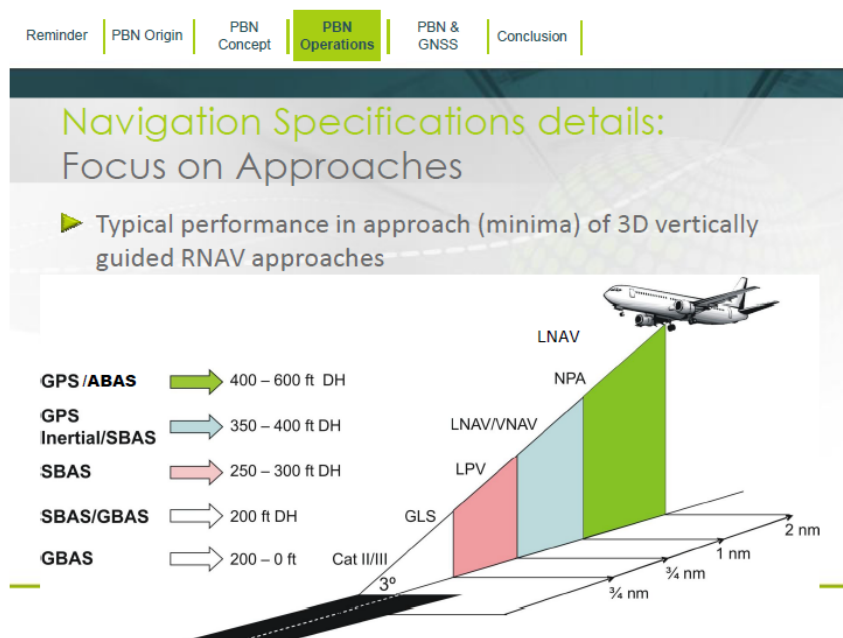


Figura 1.14: Especificaciones PBN en guiado vertical

1.4.3. Navegación PBN y los sistemas GNSS

Para concluir con PBN, es importante relacionar PBN con GNSS para entender cómo los sistemas de navegación por satélite contribuyen a la implementación de este tipo de navegación basada en requerimientos.

A día de hoy, la implementación GNSS ha permitido cambiar la forma en la que se define el espacio aéreo. Por su parte, PBN se beneficia de forma directa de los bienes de estos sistemas, a excepción de GBAS debido al tipo de señal que presentan. Esto se debe a que no presentan, salvo la ya mentada excepción, infraestructura terrestre.

De esta forma, GNSS se puede emplear para todas las operaciones PBN, desde la fase de en ruta, en la que presenta grandes beneficios en la separación, particularmente en regiones oceánicas en las que no existen balizas en tierra; pasando por la terminal. En este último caso, la precisión requerida está entre RNAV 1 y RNAV 2, empleando tanto GNSS como DME/DME, aunque este último requiere una gran cobertura, mientras que GNSS suele estar 100% disponible para este tipo de operaciones. También incluye precisión B-RNP 1 (*Basic-RNP*, menos preciso que *Precise-RNP*), basada en GNSS como sistema de navegación primario. En cuanto a la fase de aproximación, se hace uso de los sistemas de aumentación SBAS y ABAS dependiendo del tipo de guiado empleado, tal y como se muestra en la Imagen 1.15.

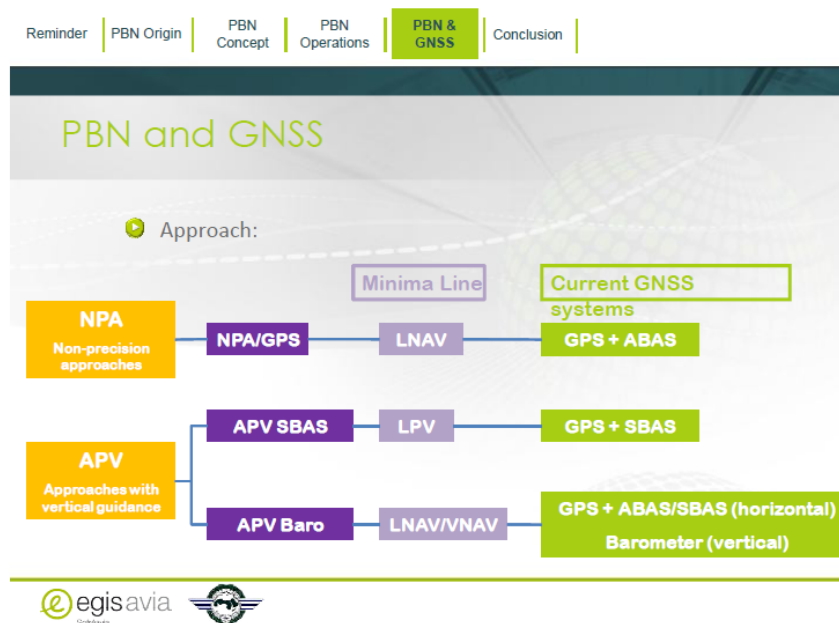


Figura 1.15: GNSS en fase de Aproximación

Como conclusión, se puede afirmar que GNSS es la clave para la implementación de PBN. Conforme la tecnología evoluciona, PBN lo hace también. Los avances futuros en materia de incluyen el aumento de segmentos curvos para otras fases distintas al segmento de aproximación; especificación RNP 3.0 para rutas bajas, especialmente para aeronaves de ala rotatoria; y la nueva especificación A-RNP (*Advanced-RNP*), basada en precisión de navegación escalable, cubriendo todas las fases de vuelo para habilitar la reducción del espacio dedicado a las rutas tanto en segmentos curvos como en rectos. La evolución debe ser conjunta con PBN a diferentes niveles: equipamiento, estándares y entrenamiento de tripulación y ATC. OACI ayuda a los estados en la implementación de PBN, a nivel tanto nacional como internacional, a través de reuniones y material guía.

1.5. Aproximación LPV-200

Una aproximación del tipo LPV-200 es aquella que proporciona, con precisión, el posicionamiento de una aeronave en pista mediante el uso del sistema GNSS de aumentación del tipo SBAS (Apartado 2.3.2) para su guiado. Éste consta tanto de ayuda vertical como horizontal, presentando una altura de decisión de 200 ft (o 61 m) sobre el umbral de la misma.

En el presente apartado se pretenden detallar las fases de una aproximación general para luego profundizar en el caso de la aproximación con requerimientos LPV-200. La definición del servicio ofrecido por EGNOS se da en el Capítulo 2, más concretamente en el Apartado 2.4.

1.5.1. Fases de una aproximación

Al diseñar una aproximación a pista se debe incluir el plan de aproximación a la misma junto con la aproximación frustrada. Ésta se diseña para aquellos casos en los que la aeronave se vea obligada a frustrar el aterrizaje y remontar el vuelo, por el motivo que sea, con el objetivo de bien volar a otro aeródromo o bien reintentar el aterrizaje.

Según los requerimientos del aeródromo y el tráfico aéreo que haya en el mismo, la fase de aproximación puede estar precedida o no de una llegada estandarizada denominada SID (*Standard Instrument Departure*).

De este modo, una aproximación puede integrarse de hasta cinco tramos independientes. Dichos tramos son: llegada, tramo inicial, intermedio, final y tramo de aproximación frustrada. Los puntos de referencia de dichos tramos se denominan de acuerdo a aquel al que preceden. Por ejemplo, el tramo inicial comienza en el punto de referencia inicial. Siguiendo la normativa, se debe construir el procedimiento incorporando los tramos necesarios debidos a las condiciones locales del aeródromo.

Por la situación del aeródromo y el poco tráfico aéreo que presenta, la normativa establece que no resulta necesaria la elaboración de una llegada, ya que, de acuerdo al flujo del tránsito aéreo, se establecerán aquellas rutas que supongan tan sólo una ventaja operacional.

Los tramos que constituyen la aproximación son:

- Tramo inicial: Está comprendido entre los puntos de referencia IAF e IF.
- Tramo intermedio: Está comprendido entre los puntos IF y FAP.

- Tramo final: Está comprendido entre los puntos de referencia FAF y MAPt.
- Tramo de aproximación frustrada: Se integra por un primer tramo de precisión, seguido de uno que ya no lo es.

La Imagen 1.16 recoge las fases ya mencionadas anteriormente y los respectivos puntos que las delimitan.

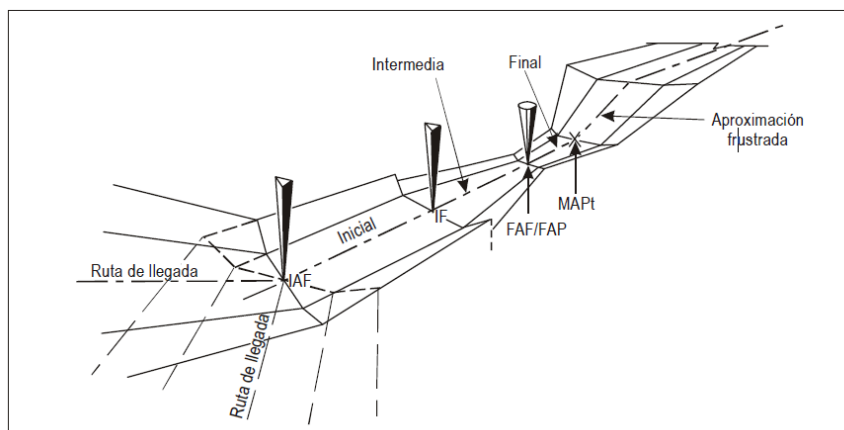


Figura 1.16: Fases de una aproximación según OACI 8168

1.5.2. Descripción de una aproximación LPV-200

Para una mejor comprensión de la realización del proyecto, es importante situar la operación LPV-200 dentro de las operaciones RNP APCH. La Imagen 1.17 muestra la clasificación de este servicio como RNP APCH.

Las aproximaciones LPV-200 se consideran como operaciones APV SBAS, ya que proporcionan guiado vertical pero no mediante un barómetro, sino haciendo uso del sistema de aumentación. En este caso, se basa en el uso de 3 satélites geoestacionarios que proporcionan correcciones al usuario. De este modo, se pueden alcanzar mínimos en la Altura de Decisión o DH (*Decision Height*) menores que los que ofrece una operación APV-Baro.

Este tipo de aproximaciones son equivalentes a aquellas realizadas con un ILS de CAT I, ya que guían a la aeronave verticalmente sin necesidad de contacto visual con la pista hasta la altura de decisión mencionada. La gran similitud con una aproximación ILS supone una gran ventaja para este tipo de aproximaciones, añadiendo, además, el ahorro que supone la instalación de la infraestructura de tierra que las antenas ILS suponen. También cabe destacar la flexibilidad en el espacio aéreo que proporcionan las aproximaciones de tipo PBN.

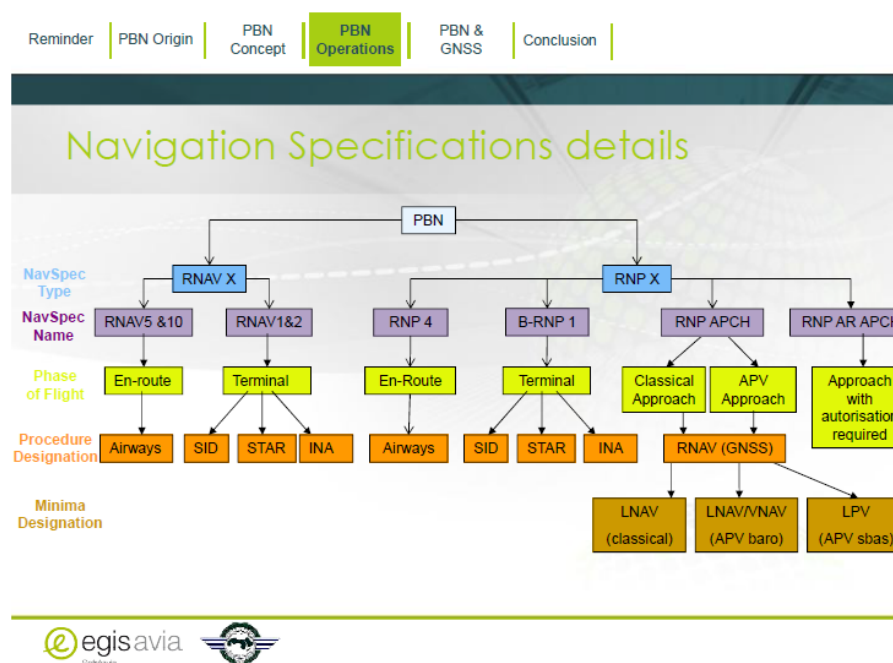


Figura 1.17: Clasificación LPV-200 como RNP APCH

Además, una aproximación LPV-200 supone una ventaja frente a su predecesora, la LPV-250, con una altura de decisión ligeramente superior (50 ft). En Europa, este tipo de aproximaciones son posibles gracias al sistema de aumentación EGNOS, que proporciona las señales necesarias a través de su servicio Safety of Life (SoL), dando cobertura a toda Europa con los requerimientos de navegación exigidos. A fecha de hoy, son ya 240 aeropuertos los que pueden operar haciendo uso de EGNOS y el crecimiento de este número se proyecta hasta el horizonte 2021. Se hablará en más detalle de estos aspectos en el Capítulo 2.

En palabras del director de la *Europea GNSS Agency* o GSA, Carlo des Dorides: "EGNOS LPV-200 es en estos momentos el tipo de operación más efectiva a nivel de costes y también la opción que proporciona un mayor nivel de seguridad en los aeropuertos". Esta sentencia deja bastante claro que LPV-200 supone el futuro de la navegación aérea.

1.5.3. Beneficios de LPV-200

Aunque, como ya se ha mencionado, se hablará en más detalle más adelante acerca del servicio, es conveniente introducir sus beneficios. La principal ventaja que éste proporciona es la equivalencia con una aproximación del tipo ILS CAT I, aunque mucho más barata debido a la supresión de la infraestructura ILS.

Existen otros beneficios derivados de esta equivalencia:

- Reducción del riesgo asociado a malas condiciones climatológicas en el aterrizaje.
- Aumento de la accesibilidad a aeropuertos.
- Reducción de retrasos, desvíos y cancelaciones en la navegación de una aeronave, reduciendo también los costes asociados a ello.
- Aumento de la capacidad del espacio aéreo y reducción de la carga de trabajo de pilotos y ATC.
- Mejora de la eficiencia de las operaciones: disminución del consumo de combustible, emisiones de CO_2 y reducción del impacto medioambiental.
- Ahorro de la instalación ILS y evitación de la posibilidad de que la senda de planeo dé problemas que ocasionen perturbaciones.
- Reducción de la dependencia de otras radioayudas terrestres.

1.5.4. Requerimientos

La mejora de los sistemas de aumentación GNSS se basa en cuatro pilares básicos: los requerimientos de la operación. Éstos son: precisión, continuidad, integridad y disponibilidad del sistema y vienen establecidos por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) junto con la EASA (*European Aviation Safety Agency*).

A continuación se hace una presentación general de los mismo, pero se realiza una mejor descripción más detallada en el Capítulo 2.

Los mínimos que se deben cumplir para llevar a cabo una operación LPV-200 son:

- **Precisión:** El HNSE (*Horizontal Navigation System Error*) debe ser menor de 16 m, mientras que el VNSE (*Vertical Navigation System Error*), de 4 a 6 m.
- **Integridad:** Existen varios términos para definir la integridad, debido a que se trata del parámetro más complicado del sistema. A grandes rasgos, se debe cumplir que el índice de seguridad, definido como ratio entre el Error del Sistema de Navegación ($xNSE$) contra el Nivel de Protección (xPL) para cada segundo, debe ser menor que 1 siempre para que no se dé situación de información engañosa.
- **Continuidad:** Se considera que ha tenido lugar un evento de continuidad cuando se produce un fallo en la misma. Por su parte, se considera fallo cuando el sistema está disponible al principio de una operación y en uno de los siguientes 15 segundos pasa a no estarlo. El riesgo de continuidad debe ser inferior a de 1 a $8 \times 10^{-6}/15$ s.

- **Disponibilidad:** Este requerimiento mide el tiempo en el que el sistema es utilizable en el área de cobertura, por lo que debe encontrarse entre el 98 % y el 99.9999 % del tiempo.

1.6. Actualidad y futuro de la navegación aérea en el aeropuerto de Teruel

Actualmente, según la información extraída tanto del AIP de ENAIRE, como de la página web del propio aeropuerto, no existe diseñada ninguna aproximación ni llegada instrumental en el aeropuerto de Teruel. Éste se rige por reglas visuales o VFR.

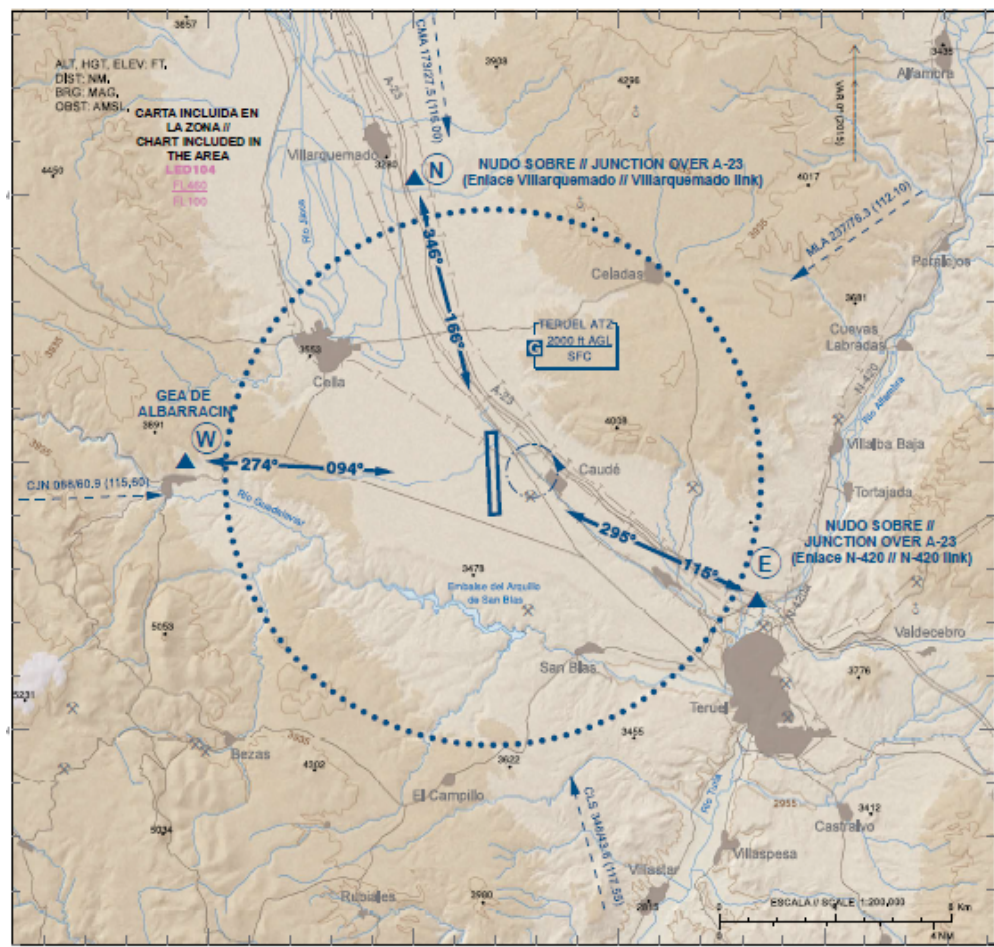


Figura 1.18: Llegadas visuales al aeropuerto de Teruel

Al tratarse de aproximaciones visuales para aeronaves del calibre de un Boeing 747, el procedimiento se vuelve fuertemente dependiente de las condiciones meteorológicas que rijan al aeropuerto en el momento del aterrizaje. La precisión de las mismas es baja y, en caso de no tener referencia visual, no se podría llevar a cabo dicho aterrizaje.

Debido a este hecho y al tipo de aeronaves que frecuentan el aeropuerto, resulta de elevado interés la introducción de un procedimiento instrumental de precisión. Al no disponerse de infraestructura en tierra, como es el caso de un ILS, la implantación de una aproximación

mediante este tipo de antenas resultaría en un elevado coste.

Por este motivo, resulta mucho más ventajosa la implantación de una aproximación que emplee el servicio LPV-200 de EGNOS, ya que no resulta necesaria la inversión en infraestructura terrestre y ya ha demostrado, con el ingente número de aeropuertos funcionando con dicho servicio, que es el futuro de la navegación aérea.

1.7. Procedimiento RNP APCH LPV-200

1.7.1. Introducción

Para diseñar un procedimiento de navegación basada en prestaciones o PBN, es necesario hacer uso de dos documentos básicos publicados por la OACI:

- Doc 9613 AN/937 *Performance-Based Navigation (PBN) Manual*.
- Doc 8168 OPS/611 Operación de aeronaves, Volumen II, Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos.

La combinación de ambos documentos proporciona la información necesaria para la construcción de la aproximación de precisión deseada para el aeropuerto de Teruel.

Por un lado, el documento 9613 proporciona la visión general de los requerimientos de una aproximación RNP APCH de tipo LPV-200 como la ya mencionada. Por otro lado, el documento 8168 es la publicación de la OACI que aporta los datos necesarios para establecer las distancias y realizar los cálculos para la construcción de la aproximación.

Como hecho adicional, en el presente proyecto se dibujan las aproximaciones para ambas cabeceras de pista, así como sus superficies de seguridad mediante el uso combinado de MATLAB y Google Earth.

1.7.2. Generalidades de la operación

El Manual de Navegación Basada en Prestaciones (doc. 9613) en su Volumen II, establece las bases para la implementación de operaciones del tipo RNAV y RNP de todos los tipos. Tanto la aproximación a la cabecera de pista 18 como a la cabecera 36 se implementan de tipo RNP APCH con mínimos LPV-200, se recurrirá a la guía del citado documento para este tipo de operaciones.

En lo referente a la descripción del tipo de operaciones que se va a diseñar, se indica que los requerimientos de navegación LPV se aplican, exclusivamente a los tramos de precisión. En estos la navegación es más delicada y se componen por el tramo final recto de la aproximación y el tramo inicial de la aproximación frustrada. Para diseñar el resto de la operación, se deberá consultar el documento 8168 de OACI.

Para saber más acerca de los requerimientos de la aeronave, entrenamiento de la tripulación y chequeo del correcto funcionamiento del sistema GNSS, se debe recurrir al documento 9613.

1.7.3. Descripción de los requerimientos de la operación

Para poder definir los requerimientos asociados a las aeronaves que operan en el aeropuerto de Teruel, es necesario definir, en primer lugar, la categoría de las mismas.

De este modo se podrán describir los mínimos que se deban cumplir en la operación, todos ellos extraídos del documento 8168 de la OACI, como ya se ha comentado.

Categoría de aeronave

Para definir la categoría de la aeronave más restrictiva que va a operar en el aeropuerto y a partir de la cual se desarrollará el procedimiento, se atiende a un criterio de velocidades definido más adelante. Dicha aeronave es, como ya se ha mencionado en la Sección 1.3.1, el jumbo de Boeing o B747-800.

Para realizar la clasificación de las aeronaves por categorías, se debe atender a la velocidad indicada en el umbral (V_{at}), igual a un 130 % de la velocidad de entrada en pérdida, V_{so} , o bien un 123 % de la velocidad de pérdida V_{slg} en la configuración de aterrizaje con la masa máxima certificada. Si se dispone de ambas velocidades, se recurrirá al máximo valor resultante de ambos cálculos.

En cuanto al Boeing 747-800, su velocidad de aproximación es de 153 kt o 161 kt, según se trate del modelo 800 o el 800 *Freighter*. En el caso de estudio se tomará la mayor, es decir 161 kt, que equivalen a 298.172 km/h. Los datos se han obtenido de la FAA.

De este modo, la categoría dentro de la que se clasifica el Boeing 747-800 según el doc. 8168 de la OACI es la **Categoría D**.

En todo momento se está tratando con velocidades IAS (*Indicated Air Speed*) no TAS (*True Air Speed*).

Velocidades (IAS) para el cálculo del procedimiento

Con la categoría de la aeronave determinada, se recurre al documento 8168 para conocer el rango de velocidades para cada fase de la aproximación que se va a desarrollar. La tabla recogida en la Imagen 1.19 se muestran dichos rangos.

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

Velocidad en umbral V_{at} basada en 1,3 veces la velocidad de pérdida V_{so} o en 1,23 veces la velocidad de pérdida V_{dg} en configuración de aterrizaje con masa máxima certificada. (No aplicable a helicópteros).

* Velocidad máxima para procedimientos de inversión e hipódromo.

** La velocidad máxima para procedimientos de inversión e hipódromo hasta 6 000 ft inclusive es de 185 km/h, y de 205 km/h por encima de 6 000 ft.

*** Los procedimientos de aproximación a un punto en el espacio para helicópteros basados en GNSS básico se podrán diseñar con velocidades máximas de 220 km/h para los tramos de aproximación inicial e intermedia, y de 165 km/h para los tramos de aproximación final y frustrada o de 165 km/h para los tramos de aproximación inicial e intermedio y de 130 km/h para los tramos de aproximación final y frustrada dependiendo de las necesidades operacionales. Véase la Parte IV, Capítulo 2.

Nota.— Las velocidades V_{at} de la columna 2 de esta tabla son la conversión exacta de los valores de la Tabla I-4-1-2, puesto que aquellos valores determinan la categoría de las aeronaves. Las velocidades de las columnas restantes se han convertido y redondeado al múltiplo de cinco más próximo por razones operacionales y, desde una óptica de seguridad operacional, se consideran equivalentes.

Figura 1.19: Tabla de velocidades (IAS) para el cálculo de procedimientos en km/h

En todo momento se tomará la velocidad más elevada para considerar el caso más desfavorable y, así, posicionarse del lado de la seguridad.

Protección lateral

Se define como protección lateral al margen de seguridad que se deja a cada lado de la aeronave para asegurar su posición y seguridad del vuelo. El valor asignado a la protección lateral depende del tipo de operación o del tramo de la misma.

En el caso de estudio, la aproximación RNP APCH con mínimos LPV-200, los requerimientos RNP asociados se encuentran en el documento 8168 de la OACI. La Tabla 1.3 muestra los valores indicados en dicho documento.

	Inicial	Intermedia	Final	Frustrada
RNP APCH LPV-200	1 NM	1 NM	Angular	1 o 0.3 NM

Tabla 1.3: Protección lateral para una aproximación LPV-200 con RNP APCH

No obstante, hay dos valores que deben comentarse por su particularidad:

- Tramo final: En el documento 8168 de la OACI, se denomina a este tramo como "angular". Esto se debe a que la aproximación empleando LPV-200 es equivalente a una de tipo ILS Cat I. Con el objetivo de mantener la continuidad, se decide mantener un RNP de 1 NM en el mencionado tramo final.
- Aproximación frustrada: Al tratarse de una fase delicada, se decide diseñarla con 2 NM. De este modo, se está del lado de la seguridad, ya que, en caso de perderse la precisión durante la frustrada, se debe poder realizar la operación con mínimos menos exigentes.

Los valores finales de RNP con los que se diseñan las aproximaciones son:

	Inicial	Intermedia	Final	Frustrada
RNP APCH LPV-200	1 NM	1 NM	1 NM	2 NM

Tabla 1.4: Protección lateral para una aproximación LPV-200 empleada

Protección vertical

La protección vertical encuentra una definición análoga a la horizontal. Sin embargo, para calcularla en el tramo de precisión, requiere del conocimiento de las superficies de evaluación de obstáculos (OAS) y la altitud/altura de franqueamiento de obstáculos (OCA/H). La OACI establece unos valores de margen mínimo de franqueamiento de obstáculos (MOC) para cada tramo, variando su valor según se trate de área primaria o secundaria.

Las áreas mencionadas se distribuyen en torno a la derrota de la aeronave según se muestra en la Imagen 1.20.

La mitad del área que se sitúa entorno a la derrota es la correspondiente al área primaria. Por su parte, el 25 % restante situado a cada lado de dicha área primaria, se corresponde con el área secundaria que disminuye hasta anularse.

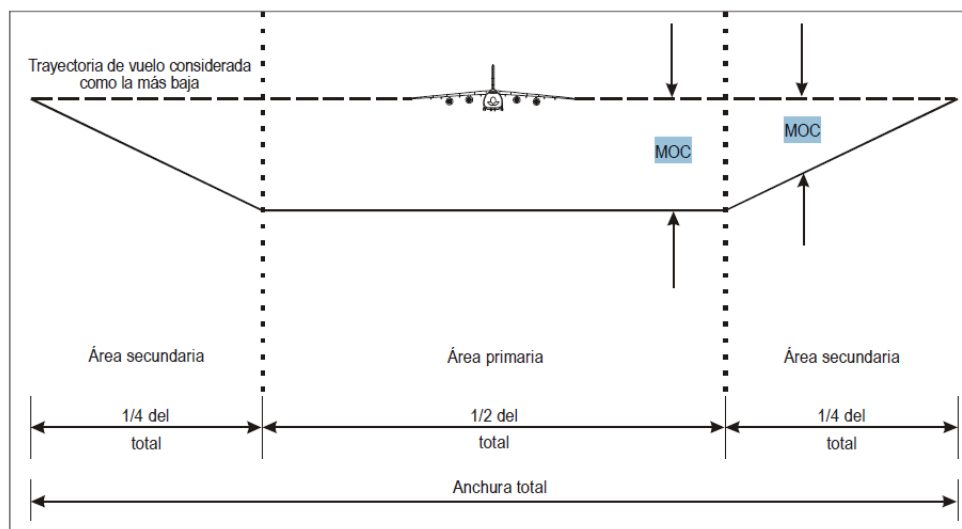


Figura 1.20: Distribución de áreas en Protección Vertical según OACI 8168

Los valores del MOC para cada uno de los tramos que integran la aproximación es:

- Aproximación inicial y circuito de espera: El MOC en el área primaria es de 300 m para el franqueamiento de obstáculos en el borde interior y se va reduciendo a cero en el borde exterior.
- Aproximación intermedia: en el área primaria es de 150 m y en la secundaria, parte de este valor y se va reduciendo a cero en el borde exterior.
- Aproximación frustrada intermedia: En el área primaria es de 30 m y en la secundaria, parte de dicho valor y se reduce a cero en el borde exterior.
- Aproximación frustrada final: El MOC en esta fase es de 50 m en el área primaria, tomando el mismo valor en el borde interior del área secundaria y reduciéndose a cero en el borde exterior.

Cálculo de la TAS

Es necesario pasar las velocidades IAS o indicadas a velocidades TAS (*True Air Speed*) para la categoría de aeronaves D. El objetivo de ello es el desarrollo de los cálculos.

El valor de la velocidad verdadera o TAS depende de parámetros como la altura y variación de temperatura con respecto a la atmósfera estándar.

La ecuación empleada para la conversión IAS a TAS es la mostrada en la Ecuación 1.1.

$$TAS = IAS \cdot 171233 \cdot \frac{((288 - VAR) - 0,006496 \cdot H)^{0,5}}{(288 - 0,006496 \cdot H)^{2,628}} \quad (1.1)$$

Donde:

- IAS: *Indicated Air Speed* (km/h).
- TAS: *True Air Speed* (km/h).
- VAR: variación de la atmósfera con respecto a la estándar. La temperatura disminuye 6.5°C por cada 1000 m.
- H: Altitud (m).

Ángulo lateral, radio de viraje y protección de los virajes

Se trata del ángulo de inclinación lateral que debe tener la aeronave. La normativa establece su valor para la categoría de aeronave, sea de 25° (1.5°/s para aeronaves pesadas) en todas las fases de aproximación, excepto en la frustrada, en la que su valor es de 15°.

Por lo que respecta a la protección del viraje, se establece como mejor opción para el método de viraje el RF. Se describe como viraje a radio constante hasta alcanzar el punto de referencia siguiendo una trayectoria circular. Queda determinado por:

- Punto tangencial al fin del viraje.
- Centro del viraje.
- Radio del viraje.
- Valor del XTT.
- Valor intermedio (BV), donde BV se define en función de la fase de operación y si se trata de RNAV o RNP.

Al tratarse de una operación de tipo RNP, se deben seguir los valores de la Imagen 1.21 para determinar el BV.

<i>Fase de vuelo</i>	<i>FTE (95%) Propio de la especificación de navegación requerida</i>
En ruta [mayor o igual que 56 km (30 NM) respecto del ARP de salida o destino]	RNAV 5 – 4 630 m (2,5 NM) RNP 4 – 3 704 m (2 NM) RNAV 2 – 1 852 m (1 NM) RNAV 1 – 926 m (0,5 NM) RNP 1 – 926 m (0,5 NM)
Terminal [SID, STAR y aproximaciones inicial e intermedia menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP]	RNAV 2 – 1 852 m (1 NM) RNAV 1 – 926 m (0,5 NM) RNP 1 – 926 m (0,5 NM) RNP APCH – 926 m (0,5 NM)
Aproximación final	RNP APCH – 463 m (0,25 NM)
Aproximación frustrada	RNP APCH – 926 m (0,5 NM)

Figura 1.21: Valores Intermedios de RNP

Para determinar el radio de viraje en las fases de vuelo de la aproximación, se puede seguir la Ecuación 1.2.

$$r = \frac{(V + V_w) \cdot 2}{127094} \cdot \tan \theta \quad (1.2)$$

Las unidades que devuelve la ecuación para el radio son km, siempre y cuando se introduzcan las velocidades en km/h. Se tiene que V es la velocidad máxima de la aeronave, V_w es la velocidad máxima del viento. Finalmente, θ es el ángulo de inclinación lateral máximo para la fase de vuelo.

Como ilustración de la construcción de un viraje del tipo RF se encuentra la Imagen 1.22.

Como sucede con el resto de tramos, la protección del viraje cuenta con una zona denominada área primaria que queda definida mediante:

- El centro del viraje en el punto O.
- Un radio cuyo valor es $r + [0.75 \cdot XTT + BV/2] / \cos 45^\circ$.
- Queda delimitada por los bordes de los tramos en línea recta adyacentes que, en la imagen, son los puntos A y C.

Se integra también por un área secundaria cuyo borde exterior está determinado por arco de circunferencia desplazado una distancia de $0.75 \cdot XTT + BV/2$ desde el borde exterior del área primaria y paralelo a éste.

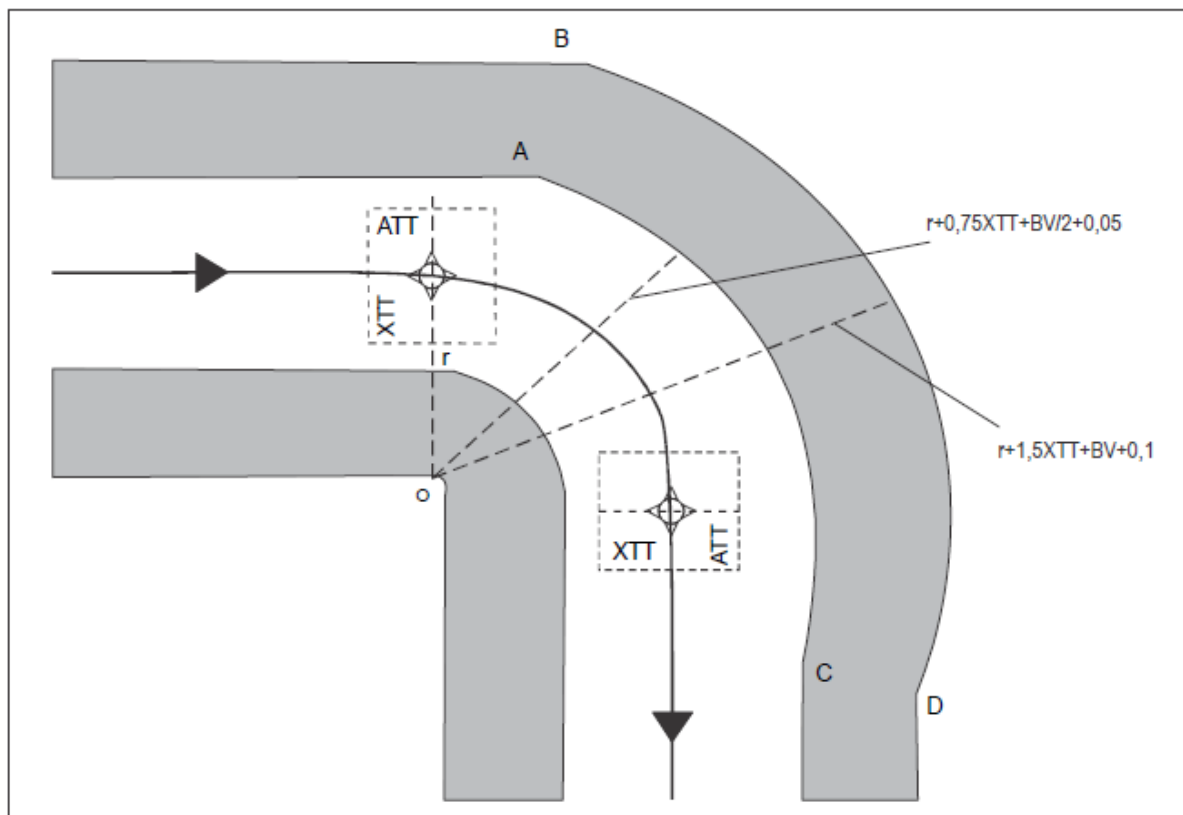


Figura 1.22: Protección de viraje RF

Determinación de la longitud mínima del tramo RNAV

Resulta también necesario el cálculo de la longitud mínima de estabilización tras los giros.

Se define como distancia de estabilización la existente entre el punto de recorrido y el punto en el que la trayectoria se une tangencialmente a la derrota nominal. Para aquellos puntos sucesivos en un recorrido, la distancia mencionada se compone de la suma de ambas distancias mínimas de estabilización. Además, la distancia varía según se trate de un punto de *fly by* o recorrido de paso, o de *fly-over*, es decir, de sobrevuelo. La diferencia entre ambos puntos se observa en la Imagen 1.23.

La distancia mínima de estabilización está tabulada y depende de la naturaleza del punto y de la categoría de la aeronave y su ángulo de inclinación lateral. Dicha tabla guía se ilustra en la Imagen 1.24. No obstante, al tratarse de una operación de aproximación, las tablas de distancia mínima de estabilización necesarias son las del ángulo de inclinación lateral de 15° y 25° para aviones y considerando tanto puntos de sobrevuelo como de paso. Quedan recogidas en las Imágenes 1.25, 1.26, 1.27 y 1.28.

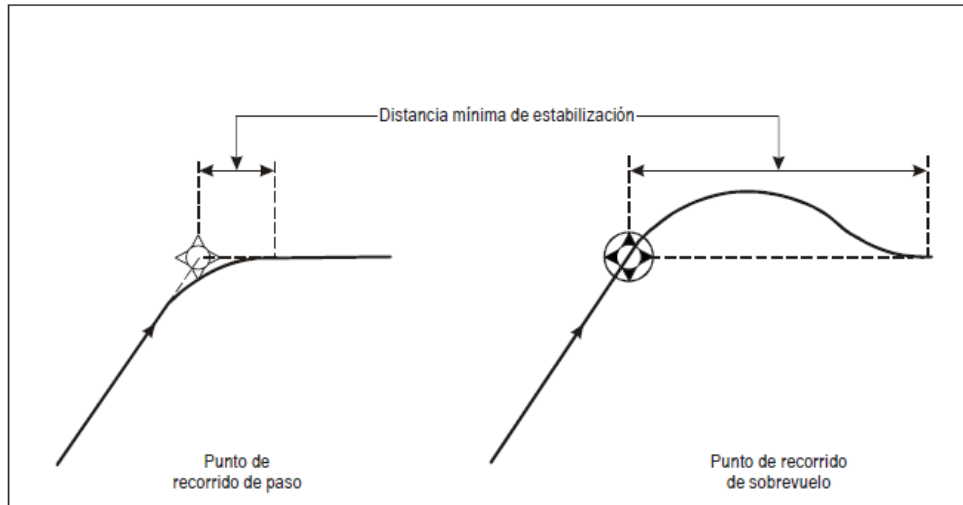


Figura 1.23: Diferencia entre punto de recorrido de paso y de sobrevuelo

Organización de las tablas de distancia mínima de estabilización

<i>Unidades</i>	<i>Tipo de punto de recorrido</i>	<i>Ángulo de inclinación Lateral</i>	<i>Número de Tabla</i>
Avión			
(SI)	De paso	15°	III-2-1-1
		20°	III-2-1-2
		25°	III-2-1-3
	De sobrevuelo	15°	III-2-1-4
		20°	III-2-1-5
		25°	III-2-1-6
(Ajenas al SI)	De paso	15°	III-2-1-7
		20°	III-2-1-8
		25°	III-2-1-9
	De sobrevuelo	15°	III-2-1-10
		20°	III-2-1-11
		25°	III-2-1-12
Helicóptero			
(SI)	De paso	15°	III-2-1-13
		20°	III-2-1-14
	De sobrevuelo	15°	III-2-1-15
		20°	III-2-1-16
(Ajenas al SI)	De paso	15°	III-2-1-17
		20°	III-2-1-18
	De sobrevuelo	15°	III-2-1-19
		20°	III-2-1-20

Figura 1.24: Guía para la determinación de velocidades en virajes

Cambio de curso* (grados)	Velocidad verdadera (km/h)															
	< σ =	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°.

Figura 1.25: Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

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

* 25° o 3°/s

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

Figura 1.26: Distancia mínima de estabilización entre puntos de recorrido de paso (unidades SI, 25° de ángulo de inclinación lateral)

Cambio de curso* (grados)	Velocidad verdadera (km/h)															
	< σ =	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°.

Figura 1.27: Distancia mínima de estabilización entre puntos de sobrevuelo (unidades SI, 15° de ángulo de inclinación lateral)

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

* 25° o 3°/s

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

Figura 1.28: Distancia mínima de estabilización entre puntos de sobrevuelo (unidades SI, 25° de ángulo de inclinación lateral)

Es importante destacar, como conclusión del apartado, que la longitud mínima de esta-

bilización no supone problema alguno, ya que las operaciones han sido diseñadas de forma amplia y dejando márgenes suficientes para no violar dicha longitud.

1.7.4. Descripción de las generalidades de los tramos de la operación

En la presente Sección se pretenden detallar las generalidades del diseño de una aproximación con mínimos LPV-200, empleando SBAS para ambas cabeceras de pista en el ya descrito aeropuerto de Teruel. La aeronave de referencia es el Boeing 747-800, de categoría D.

Se han diseñado tanto la aproximación inicial, como la intermedia y la final, conjuntamente con la frustrada. Esta última permite a la aeronave retomar el aterrizaje o bien continuar el vuelo hasta otro aeropuerto alternativo en condiciones que lo permitan.

A grandes rasgos, la aproximación inicial y la intermedia se diseñan para suavizar la transición desde la fase de descenso hasta la de aterrizaje. La frustrada, por su parte, se diseña para casos en los que el aterrizaje no pueda realizarse en un primer intento y se deba retomar o buscar un aeropuerto alternativo para ello. En este caso, la frustrada se empleará para devolver a la aeronave al punto de aproximación inicial de forma segura.

Para la realización de esta parte del proyecto se ha hecho uso de la documentación ya mencionada, así como del *software* Matlab.

Tramo de aproximación inicial

El tramo de aproximación inicial está comprendido entre los puntos IAF (*Initial Approach Fix*) e IF (*Intermediate Approach Fix*). El primero de ellos indica dónde comienza el segmento de aproximación por instrumentos y, el segundo, el final del tramo inicial y comienzo del intermedio.

Para la mejor gestión del tráfico aéreo, se han tenido en cuenta todas las posibles operaciones existentes en el diseño. Dicho tramo puede disponer de un hipódromo de descenso, circuito de espera o procedimiento de inversión. Adicionalmente, puede presentar un punto IAF o disponer de varios de ellos en una aproximación conocida como en Y o en Z.

No obstante, la poca afluencia diaria de tráfico en el aeropuerto de Teruel permite que el diseño de la aproximación inicial se simplifique. Pese a su simplicidad, la gestión del tráfico no presenta problemas.

De este modo, el tramo de aproximación inicial dispone de un circuito de espera y de un único IAF para la aproximación. Cabe destacar que existirá uno por cabecera de pista.

El objetivo del tramo de aproximación inicial es el de reducir la altitud de vuelo de la aeronave y situarla alineada con la pista.

Siguiendo la normativa ya mencionada, las altitudes mínimas en el primer tramo de la aproximación inicial se deben dar en incrementos de 100 ft o 50 m. Además, las altitudes y alturas del procedimiento no deben ser en ningún caso inferiores a la OCA/H y se deben establecer de modo que las aeronaves puedan interceptar el tramo de aproximación final con la pendiente adecuada. El Margen Mínimo de Franqueamiento de Obstáculos o MOC es de, por lo menos 300 m en el área primaria, reduciéndose a cero desde este valor en el borde exterior del área secundaria.

Por otro lado, el ángulo de intersección entre la derrota de aproximación inicial y la de la intermedia no debe exceder los 120° y su longitud, pese a no estar normalizada, debe ser suficiente para permitir los cambios de altitud que se requieran cumpliendo con los requerimientos de pendiente. La longitud óptima se establece en 9 km.

Finalmente, la pendiente establecida para la aproximación inicial es de 4 % en su valor óptimo, aunque se puede aumentar hasta el 8 % para franquear los obstáculos existentes. Pese a que ese 8 % es el valor máximo, se puede aumentar a 13.2 % si la velocidad IAS está restringida a 165 km/h.

Circuito de espera

Antes de iniciarse la aproximación al aeropuerto, se debe diseñar un circuito de espera. Este se sitúa sobre el punto IAF y permite al aeropuerto regular el tráfico de entrada al mismo. Para optimizar el procedimiento se diseña uno por cada aproximación.

Para el caso de estudio, se ha decidido diseñar una espera de entrada directa, en la que, una vez alcanzado el punto de referencia, la aeronave virará hacia la izquierda y seguirá en el circuito de espera, alejándose del punto de referencia. Cuando la aeronave retorne a dicho punto, volverá a virar tomando el tramo de alejamiento de nuevo, repitiendo el proceso hasta que reciba autorización para iniciar la aproximación.

El circuito se compone de las siguientes partes:

- **Tramo de alejamiento:** En él, la aeronave se aleja del punto de referencia (IAF en

este caso) durante un tiempo determinado.

- **Tramo de acercamiento:** En este tramo, la aeronave se acerca al punto de referencia. Es paralelo al tramo de acercamiento.
- **Virajes:** Existen dos virajes. El primero de ellos lo realiza la aeronave para situarse sobre la derrota del tramo de alejamiento. El segundo, por su parte, se realiza para situarse sobre la derrota del tramo de acercamiento.

De acuerdo a dichas partes, se establecen los valores de tiempo que determinan la longitud de los tramos de acercamiento y alejamiento. Para el caso del tramo de alejamiento, se cronometra un minuto, ya que la altura del IAF es de menos de 4250 m. Al definir la distancia que ocupa dicho cronometraje, se debe tener en cuenta de que deben quedar, por lo menos, 30 segundos disponibles en la derrota de acercamiento una vez finalizado el viraje.

La velocidad para diseñar el tramo de espera, se debe elegir de acuerdo a la aeronave más rápida que opere en el aeropuerto. La Imagen 1.29 muestra la tabla que recoge las velocidades indicadas (IAS) para el diseño de la espera de acuerdo a la altitud.

<i>Niveles¹</i>	<i>Condiciones normales</i>	<i>Condiciones de turbulencia</i>
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
<ol style="list-style-type: none"> 1. Los niveles de esta tabla representan <i>altitudes</i> o los correspondientes <i>niveles de vuelo</i>, 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). 		

Figura 1.29: Velocidades para el diseño de la espera

En cuanto al ángulo de inclinación lateral que se debe considerar para los virajes, será de 25°. La velocidad angular se puede calcular a partir de la gráfica de la Imagen 1.30.

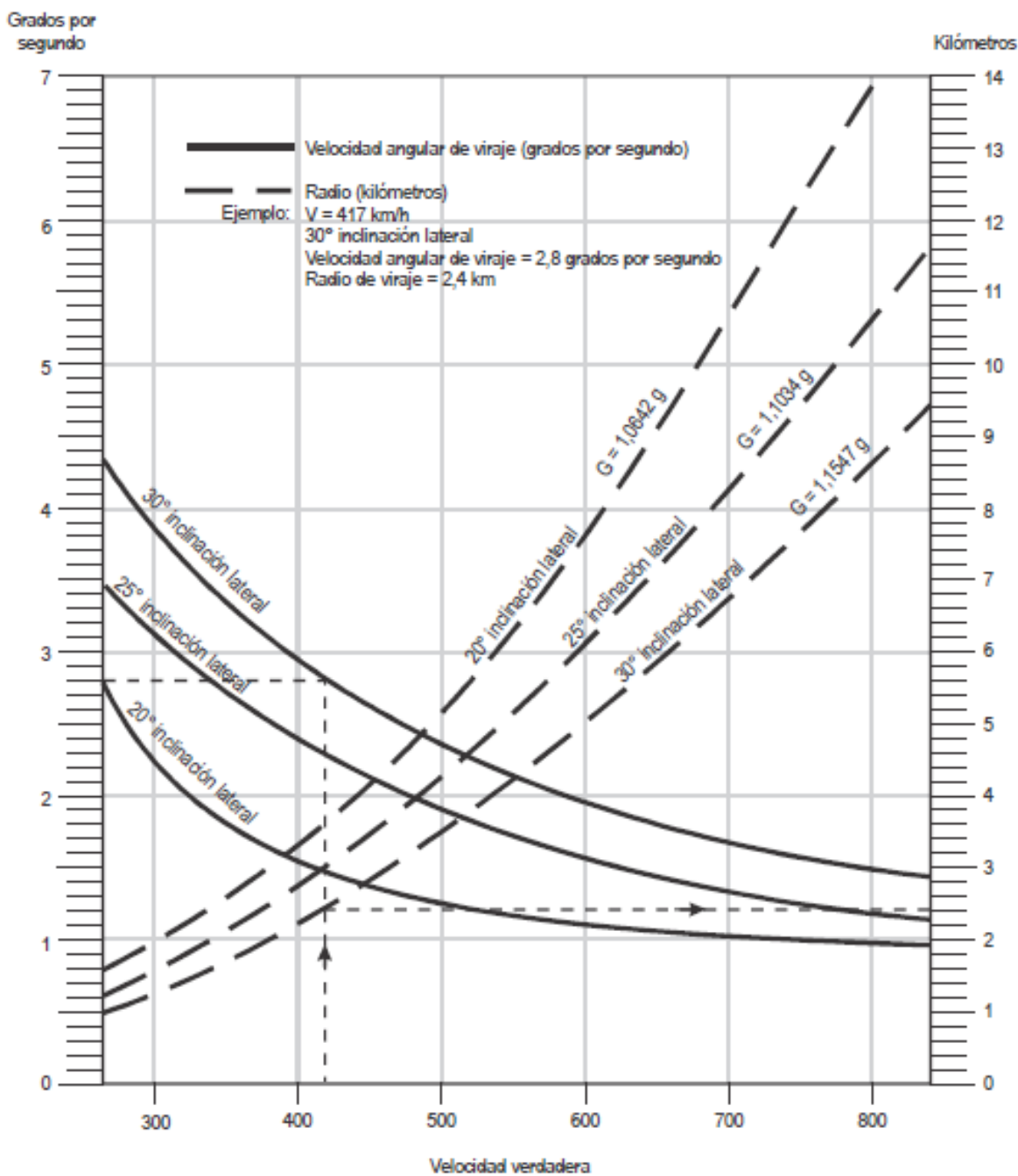


Figura 1.30: Gráfica para el cálculo del radio de giro y velocidad angular para el viraje de espera

En lo referido al franqueamiento de obstáculos, se debe dejar un margen de 300 m para el área primaria, tal y como sucedía en la aproximación inicial. En cuanto al área secundaria,

se reduce hasta alcanzar un valor de 0 en el borde exterior. En caso de encontrarse en terreno montañoso, se extiende hasta 600 m. Se sigue, no obstante, la tabla de la Imagen 1.31 para el diseño del franqueamiento de obstáculos.

<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

Figura 1.31: Franqueamiento de obstáculos en espera

Conocidas las generalidades de la espera, es necesario entender el diseño del procedimiento. Para una espera en forma de hipódromo, se deben tener en cuenta las siguientes variables:

- Altitud a la que se situará. En este caso coincide con la del IAF.
- Temperatura correspondiente a dicha altitud para atmósfera ISA + 15°C.
- Velocidad indicada o IAS correspondiente a la aeronave más rápida. En este caso se trata de una de tipo D. Ésta, se debe convertir a velocidad verdadera o TAS. Para ello, se halla la constante K de conversión según la tabla mostrada en la Imagen 1.32. Haciendo uso de dicha tabla y de la Ecuación 1.3 se puede encontrar el valor de K para la altitud deseada.

$$K = K_a + (h - h_a) \cdot \frac{K_b - K_a}{h_b - h_a} \quad (1.3)$$

La velocidad verdadera se calcula según la Ecuación 1.4.

$$TAS = K \cdot IAS \quad (1.4)$$

- Velocidad del viento, omnidireccional y calculada según la Ecuación 1.5.

$$w = (12h + 87) \quad (1.5)$$

Donde h es la altitud y w la velocidad calculada para el viento.

- Ángulo de inclinación lateral, establecido en 25°.
- Área de tolerancia del punto de referencia que, en este caso, es el IAF.
- Tolerancia técnica de vuelo, dividida a su vez en:
 - Cronometraje de alejamiento: ± 10 segundos.
 - Tiempo de reacción del piloto: 6 segundos.
 - Establecimiento del ángulo de inclinación lateral: 5 segundos.
 - Tolerancia de rumbo: $\pm 5^\circ$.

La longitud del tramo de alejamiento se calcula según la velocidad de la aeronave en km/s y de los segundos que se inviertan en su cronometraje. De este modo, se puede calcular según la Ecuación 1.6.

$$L = TAS \cdot \frac{1000}{3600} \cdot t \quad (1.6)$$

También resulta importante el cálculo de la velocidad angular de giro y del radio de giro. Para ello, se hace uso de las Ecuaciones 1.7 y 1.8, respectivamente. En los apartados 1.8 y 1.9 se hará mención a dichas ecuaciones en el momento en el que se haga uso de las mismas para hallar el valor numérico asociado a cada caso.

$$R = 6355 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\pi \cdot TAS} \quad (1.7)$$

Con α el ángulo lateral en grados y TAS la velocidad verdadera en km/h, siendo R la velocidad angular en $^\circ/s$.

$$r = 0,18 \cdot \frac{TAS}{\pi \cdot R} \quad (1.8)$$

Siendo r el radio en km, TAS la velocidad verdadera en km/s y R la velocidad angular en $^\circ/s$.

<i>Altitud (metros)</i>	<i>Factor de conversión</i>							
	<i>ISA-30</i>	<i>ISA-20</i>	<i>ISA-10</i>	<i>ISA</i>	<i>ISA+10</i>	<i>ISA+15</i>	<i>ISA+20</i>	<i>ISA+30</i>
0	0,9465	0,9647	0,9825	1,0000	1,0172	1,0257	1,0341	1,0508
500,0	0,9690	0,9878	1,0063	1,0244	1,0423	1,0511	1,0598	1,0770
1 000,0	0,9922	1,0118	1,0309	1,0497	1,0682	1,0774	1,0864	1,1043
1 500,0	1,0163	1,0366	1,0565	1,0760	1,0952	1,1046	1,1140	1,1325
2 000,0	1,0413	1,0623	1,0830	1,1032	1,1231	1,1329	1,1426	1,1618
2 500,0	1,0672	1,0890	1,1105	1,1315	1,1521	1,1623	1,1724	1,1923
3 000,0	1,0940	1,1167	1,1390	1,1608	1,1822	1,1928	1,2032	1,2239
3 500,0	1,1219	1,1455	1,1686	1,1912	1,2135	1,2245	1,2353	1,2568
4 000,0	1,1507	1,1753	1,1993	1,2229	1,2460	1,2574	1,2687	1,2910
4 500,0	1,1807	1,2063	1,2313	1,2558	1,2798	1,2917	1,3034	1,3266
5 000,0	1,2119	1,2385	1,2645	1,2900	1,3150	1,3273	1,3395	1,3636
5 500,0	1,2443	1,2720	1,2991	1,3256	1,3516	1,3644	1,3771	1,4022
6 000,0	1,2779	1,3068	1,3350	1,3627	1,3897	1,4031	1,4163	1,4424
6 500,0	1,3130	1,3430	1,3725	1,4013	1,4295	1,4434	1,4572	1,4843
7 000,0	1,3494	1,3808	1,4115	1,4415	1,4709	1,4854	1,4998	1,5281
7 500,0	1,3873	1,4201	1,4521	1,4835	1,5141	1,5292	1,5442	1,5737

Figura 1.32: Tabla de conversión de IAS a TAS

Finalmente, se realizará la construcción del área según el método simplificado del rectángulo. Las ecuaciones para dicho método se recogen en la Ecuación 1.9. Este método simplificado consiste en construir el área primaria o básica de protección del hipódromo de espera considerándola como un rectángulo cuyos vértices se hayan con las ya citadas ecuaciones. A dicha área, se le añade el área secundaria pertinente que, en este caso y por tratarse de un hipódromo de espera, es de 9.3 km.

El sistema de referencia sitúa al origen en la radiobaliza, en este caso inexistente. Para subsanar este problema, se imagina una baliza ficticia con la coordenada y coincidente en el punto de referencia o IAF y la coordenada x idéntica a la del centro del arco del viraje de 180° más próximo. La x negativa se sitúa en la dirección del acercamiento y la y negativa, perpendicular y apuntando hacia dicho tramo de acercamiento. Todo ello ha sido extraído

de la norma presente en el Doc 8168 de la OACI.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{max} = TAS \cdot (0,0167t + 0,0297) + W \cdot (0,0167t + 0,0381) - 1,67 \\ x_{min} = TAS \cdot (-0,0241) + W \cdot (-0,037) + 2,04 \\ y_{max} = TAS \cdot (0,0012t + 0,0266) + W \cdot (0,0258t + 0,0368) + 0,843t - 5,37 \\ y_{min} = TAS \cdot (-0,0015t - 0,0202) + W \cdot (-0,0167t - 0,027) + 1,3 \end{array} \right. \quad (1.9)$$

Donde W es la velocidad del viento en km/h, TAS la velocidad verdadera, también en km/h, y t es el tiempo de cronometraje de alejamiento en minutos.

Tramo de aproximación intermedio

El tramo de aproximación intermedio está comprendido entre el IF (*Intermediate Fix*) y el FAP (*Final Approach Point*). Como ya se ha mencionado, el IF determina el inicio del tramo intermedio y el final del inicial. Por su parte, el FAP determina el comienzo del tramo de aproximación final, ya alineado con la derrota de pista.

En el tramo intermedio, el piloto prepara la aeronave para el aterrizaje, ajustando la velocidad, posición, superficies de control como flaps, tren de aterrizaje, etc. Es decir, realiza el ajuste a la configuración de aterrizaje.

Se establece el objetivo del tramo de aproximación intermedio en proporcionar la guía de derrota de acercamiento al FAP, donde finaliza dicho tramo intermedio.

Para una operación empleando SBAS, como es el caso de estudio, se debe realizar la transición a este tipo de ayuda a la navegación a 3.7 km antes del FAP, según la norma. Además, la derrota a seguir en el tramo de aproximación intermedia debe ser la misma que la de aproximación final. La longitud del mismo debe estar comprendida entre 28 km y 9.3 km, encontrándose su óptimo en 19 km.

En cuanto a la altitud o altura del procedimiento y pendiente de descenso, se establece que, en dicho tramo, se debe ajustar la velocidad y configuración de la aeronave, como ya se ha mencionado, para inicial el tramo de aproximación final. Por ello, debe ser horizontal y carecer de pendiente o al menos contener una parte que transcurra en estas condiciones. En caso de realizarse algún tipo de descenso, la pendiente máxima autorizada es de 5.2% o, si se restringe la velocidad a 165 km/h, del 13.2%. Con las altitudes y alturas necesarias para una correcta interceptación de la pendiente de aproximación final establecida, es también necesario establecer la longitud del segmento horizontal del mismo. Para una aeronave de

categoría D, dicha longitud es de MIRAR km.

Finalmente, resulta necesario calcular el margen de franqueamiento de obstáculos. El área primaria presenta un valor de 150 m como mínimo, partiendo el área secundaria de éste valor y haciéndose cero en su borde exterior.

Tramo de aproximación final

Se trata del tramo más crítico de la aproximación, ya que sitúa a la aeronave en la cabecera de la pista de aterrizaje.

Como el resto de tramos, está comprendido entre dos puntos. En este caso son, por un lado, el FAP (*Final Approach Point*) y el MAPt (*Missed Approach Point*). Este último punto marca el inicio de la aproximación frustrada. El tramo de aproximación final es crítico, ya que se realizan dos acciones clave: la alineación con pista y el descenso. Para una aproximación con mínimos LPV-200, las características de la misma son las que presenta una con ILS CAT I, pero reduciendo los inconvenientes que ésta presenta.

La longitud óptima de la aproximación final es, según la normativa, de 9.3 km, siendo la máxima de 18.4 km. Además, es importante mencionar que no se admiten aproximaciones finales desplazadas por motivos de atenuación de ruidos, pudiendo realizarse sólo cuando los obstáculos no lo permitan.

En cuanto a la pendiente de descenso, será de 3° , encontrándose su máximo en 3.5° . No se debe exceder este valor salvo que, tras haber intentado realizar el diseño por todos los medios posibles, no se haya conseguido mantener. Una pendiente más pronunciada puede provocar el alcance de velocidades verticales de descenso demasiado elevadas y que superen los límites recomendados para algunas aeronaves en aproximación final. Cuando por motivos de franqueamiento de obstáculos no se pueda usar dicha pendiente, se realizará un estudio del caso.

Otro parámetro importante a determinar es la DA/H o altitud/altura de decisión. Por tratarse de una aproximación empleando LPV-200, este parámetro viene ya definido por la propia operación. Su valor es de 200 ft, que en el sistema métrico es de 61 m.

También se determinan las superficies y parámetros determinantes en el diseño de la operación como son la OAS y la OCA/H, definidas más adelante.

Descripción de la OAS

En este apartado se procede a describir las superficies OAS (*Obstacle Assessment Surface*), las constantes empleadas para definir las, así como las condiciones que regulan los ajustes que se deban realizar.

Las OAS se definen como las superficies de evaluación de obstáculos y se establecen en torno a la pista siguiendo las características del aeródromo. Gracias al diseño de estas superficies, la aeronave es capaz de franquear de forma segura los obstáculos. Actualmente se usan en sustitución de las superficies ILS básicas, más restrictivas y ya obsoletas por la mayor precisión que presentan los equipos de navegación de las aeronaves de hoy.

Las dimensiones de la OAS se relacionan con los siguientes parámetros:

- La geometría del ILS (distancia localizador/umbral, ángulo de la trayectoria de planeo, RDH del ILS y anchura del sector del localizador). En el caso de estudio, se debe realizar el ajuste de los valores para el uso de SBAS.
- La categoría de la operación ILS, que para este caso es equivalente a CAT I.
- También influyen factores como la geometría de la aeronave y la pendiente de ascenso en aproximación frustrada.

En caso de que alguno de los valores se sale de los estándares, se deben realizar las correcciones pertinentes. No obstante, en el diseño de este tipo de aproximaciones, todos los valores se encuentran dentro de la normalidad.

El sistema de coordenadas empleado se muestra en la Imagen 1.33.

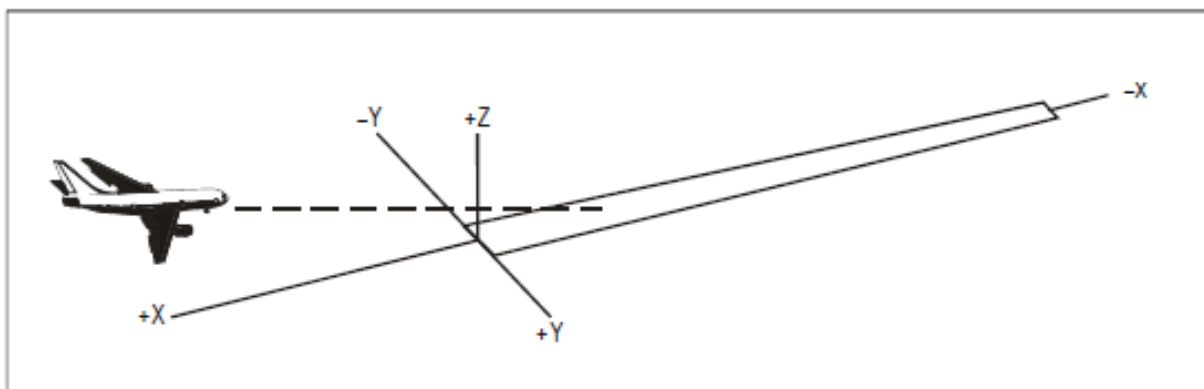


Figura 1.33: Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas empleado para localizar los obstáculos es el convencional y su origen se sitúa en el umbral. La coordenada x es siempre positiva antes del umbral, la z es positiva hacia arriba y la y completa el triedro, considerándose positiva en los cálculos de la OAS debido a la geometría de la misma.

Como ya se ha mencionado, las superficies de las OAS quedan definidas mediante las constantes de las ecuaciones de los planos que las definen o mediante las coordenadas de los puntos que las delimitan. Existe un soporte de OAS de los PANS-OPS que proporciona los coeficientes para ángulos de trayectoria de planeo entre 2.5 y 3.5° , con incrementos de 0.1° y para cualquier distancia de localizador/umbral entre 2000 y 4500 m. Este *software* se ha empleado en el desarrollo del proyecto debido a la facilidad de su uso y para agilizar los cálculos.

Las OAS se integran por 4 tipos de superficies distribuidas de forma simétrica respecto al eje de pista y son: Z, Y, X y W, tal y como se muestra en las Imágenes 1.34 y 1.35.

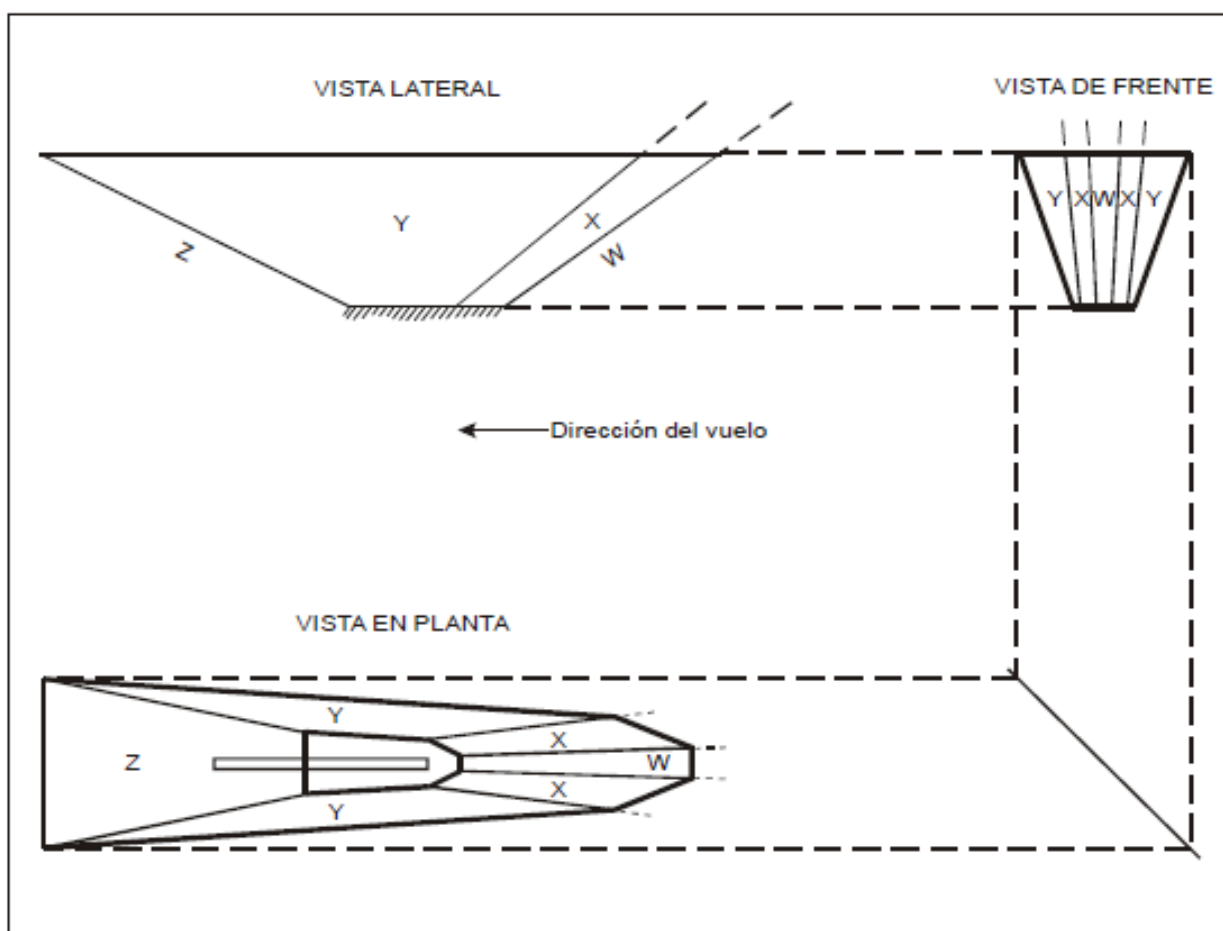


Figura 1.34: Superficies OAS (1)

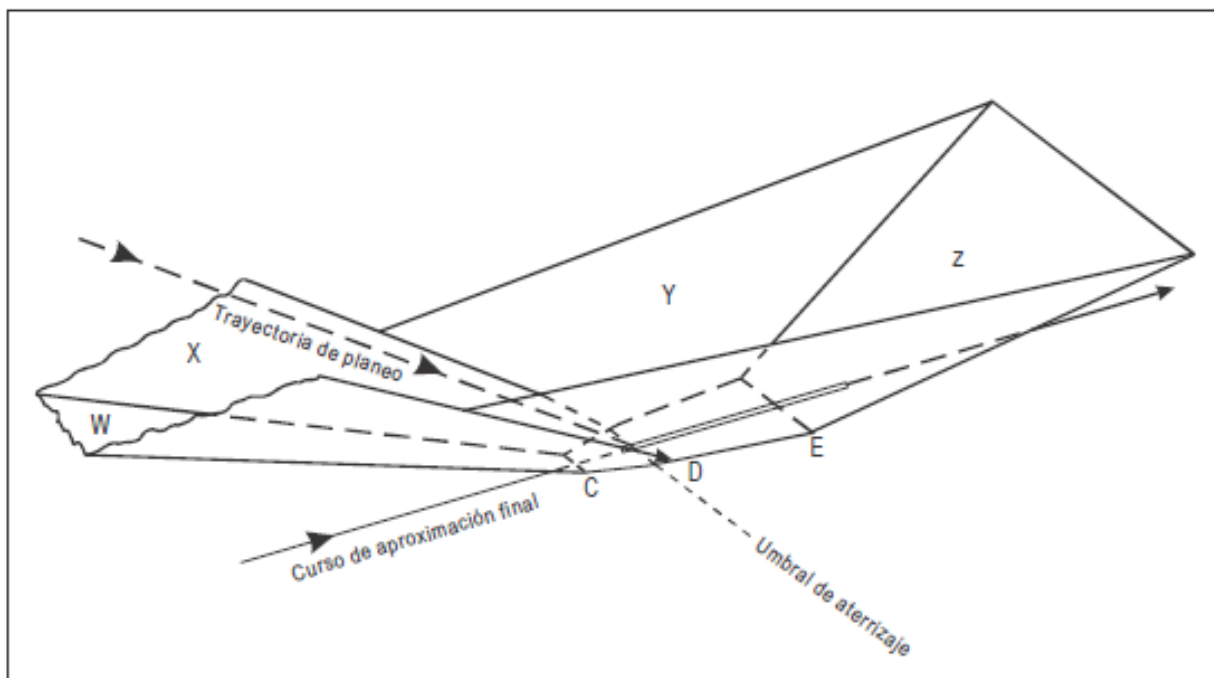


Figura 1.35: Superficies OAS (2)

Las ecuaciones que definen la geometría son de tipo lineal y de la forma mostrada en la Ecuación 1.10, donde x e y son las coordenadas de posición y z , la de altura.

$$z = Ax + By + C \quad (1.10)$$

Descripción de la OCA/H

La OCA/H (*Obstacle Clearance Altitude/Height*) se define como la menor altitud o altura por encima de la elevación del umbral de pista, empleada para asegurar el cumplimiento del criterio mínimo de franqueamiento de obstáculos.

Esta altitud o altura se calcula haciendo uso de las OAS y de las coordenadas y altura de los obstáculos del aeródromo respecto al umbral de pista. Depende de la categoría de la aeronave y, para el caso de estudio, se comenzará diseñando la Categoría D en la que se incluye el Boeing 747-800. No obstante, las constantes que definen la OAS varían según la categoría y, esto, afectará al diseño de la OCA/H.

Partiendo de los obstáculos del aeródromo en coordenadas cartesianas locales con respecto al umbral de la pista y del programa OAS de PANS-OPS, se determina en qué superficie OAS está el obstáculo, altura respecto al umbral y si perfora o no la superficie. En caso de haber obstáculos en la zona de aproximación frustrada, se debe calcular la altura equivalen-

te en la zona de aproximación. A continuación, se establece el obstáculo determinante en la aproximación, es decir, el que tenga mayor altura o altura equivalente si está en la zona de frustrada.

De este modo, se obtiene el mayor obstáculo que supondrá, además, una mayor desventaja. La OCA/H se calcula sumando al valor de altura de dicho obstáculo, el margen de vuelo del baroaltímetro. Este margen se escoge por ser el caso de mayor desventaja en caso de fallo del piloto automático, situándose así el diseño del lado de la seguridad. Como ya se ha mencionado, el valor de la OCA/H depende de la categoría de la aeronave, ya que el margen de baroaltímetro varía en función de la misma.

Para conocer con mayor detalle el diseño de esta altitud/altura, se debe acudir a las Secciones 1.8.3 y 1.9.3.

Aproximación frustrada

Finalmente, quedan por describir las generalidades de la aproximación frustrada. Este tramo es el que se encarga de remontar el vuelo para volver al IAF y reiniciar el aterrizaje, en caso de que el piloto o la autoridad pertinente consideren que el aterrizaje no se puede realizar de forma segura.

La aproximación frustrada comenzará en el *Start Of Climb* (SOC) o punto de comienzo de ascenso. Para determinar dicho punto, se emplearán la altura y distancia a las que el plano GP' (plano paralelo a la trayectoria de planeo y con origen en -900 m al nivel del umbral) alcanza la altitud OCA/H.

El primer tramo de la aproximación frustrada es de precisión y se define como aquel en el que la aeronave sobrevuela las superficies OAS. Según la norma, este tramo finaliza cuando la superficie Z alcanza una altura de 300 m por encima del umbral. Una vez superada esta altura, la situación de la aeronave es menos crítica.

La pendiente óptima de la aproximación frustrada es de 2.5 %, lo que equivale a 1.43°.

Para finalizar y siguiendo la tendencia de diseñar aproximaciones seguras, se diseña el primer tramo con un RNP de 1 NM, pero, superado éste, se hace con un RNP de 2 NM. Esto se debe a que, en caso de fallo del sistema de navegación de EGNOS LPV-200, exista un margen de seguridad en el que la aeronave sea capaz de cumplir los mínimos requerimientos establecidos durante la frustrada.

1.8. Construcción del procedimiento de aproximación para la pista 18

En el presente apartado se expone el diseño final de la operación RNP APCH empleando SBAS con requerimientos LPV-200, diseñada para la cabecera de pista 18 del aeropuerto de Teruel y para la categoría de aeronave de tipo B en la que se incluye el B747-800. La elevación de dicho umbral con respecto al nivel del mar es de 1005 m.

Se siguen las generalidades expuestas en la Sección 1.7.2 aplicadas a la pista 18 y se presentan los detalles de la aproximación en esta cabecera.

Para acompañar la descripción de la aproximación, se incluyen imágenes extraídas con Google Earth que se han dibujado haciendo uso de Matlab. Con ellas, se puede ilustrar el diseño de la aproximación.

1.8.1. Tramo de aproximación inicial

El tramo de aproximación inicial se encuentra, como ya se ha comentado, entre el fijo IAF (*Initial Approach Fix*) y el IF (*Intermediate Fix*). Ambos se diseñan como puntos *fly-by*, es decir, de paso, por lo que su sobrevuelo no es obligatorio. De este modo, la aeronave debe pasar por ellos, pero no sobrevolarlos. En este caso, se ha diseñado de forma que entre ambos puntos, la aeronave deba realizar un giro de 90° , de modo que no volará nunca sobre el IF.

En caso de realizarse una aproximación frustrada, tampoco se sobrevolará el IAF, ya que se encontrará girando para reajustar su rumbo.

En cuanto a la necesidad de notificación por parte del piloto al pasar por estos *waypoints*, se decide establecer el IAF como punto de notificación obligatoria, pero no el IF. De este modo, se pretende alcanzar la seguridad del vuelo, notificando el momento de inicio de la aproximación.

En cuanto al cambio de rumbo realizado en este tramo, es necesario que la aeronave vaya reduciendo la altitud de vuelo al mismo tiempo que se sitúa con la derrota de aterrizaje. El giro del tramo inicial consigue este propósito, ya que el tramo de aproximación intermedio está encarado con la pista.

La longitud del tramo se establece en 10.5 km para permitir el alejamiento del IAF lo suficiente como para que la frustrada, en su retorno al fijo inicial, no sobrevuele terreno muy

montañoso.

La pendiente del tramo se establece, según la normativa, en 4.28 %, o 2.45°, para situar al IAF 450 m sobre el IF y 1550 m sobre el umbral de pista.

El margen mínimo de franqueamiento de obstáculos es de 300 m en el área primaria y en el borde interior de la secundaria, reduciéndose a cero en el exterior. Se ha verificado la no vulneración de dicho margen.

Hipódromo de espera

Para asegurar la correcta confluencia el tráfico aéreo en el aeropuerto de Teruel, así como para evitar accidentes en pista, se diseña un procedimiento de espera en el IAF. Dicho procedimiento de espera se diseñará en forma de hipódromo. Se han seguido las pautas ya mencionadas en la Sección 1.7.4 de acuerdo con el Documento 8168 de la OACI.

Los parámetros establecidos para su diseño son:

- **Altitud:** Se ha seleccionado la altitud del IAF para situar el hipódromo de espera, es decir, 1550 m sobre el umbral de pista.
- **Velocidad:** Se ha elegido la mayor de las velocidades para la categoría D que es, en este caso, de 306 km/h. Se debe tener en cuenta que se trata de la velocidad indicada o IAS. Para obtener la verdadera o TAS, se ha calculado el coeficiente de conversión K mediante una interpolación de la tabla mostrada en la Imagen 1.32. El valor de K es, entonces, 1.165655 adimensional. De este modo, la velocidad TAS es de 356.7 km/h.
- **Velocidad del viento:** Se ha hecho uso de la Ecuación 1.5 y se ha obtenido una velocidad de 117.66 km/h para la altitud de 2555 m sobre el nivel del mar.
- **Tiempo:** El tiempo cronometrado para el tramo de alejamiento es de 1 minuto.
- **Velocidad angular:** La velocidad angular se calcula de acuerdo a la Ecuación 1.7 y devuelve un valor de 2.64°/s.
- **Radio de giro:** El radio de giro se calcula según la Ecuación 1.8 y arroja un valor de 2.15 km.
- **Longitud del tramo de alejamiento:** De acuerdo a la velocidad y al tiempo cronometrado de alejamiento, se obtiene una longitud de 5.94 km, sin incluir las tolerancias técnicas de vuelo que tienen en cuenta el tiempo de reacción del piloto, de estabilización del ángulo lateral y de alejamiento.

Con estos parámetros es posible diseñar el circuito de espera en forma de hipódromo. Por su parte, el franqueamiento de obstáculos debe ser de 300 m en el área primaria o básica. Para el área secundaria, se toma el mismo valor en el borde interior y se reduce a cero en el exterior.

1.8.2. Tramo de aproximación intermedio

Se trata del tramo de aproximación que comienza en el IF (*Intermediate Fix*) y acaba en el FAP. El fijo IF es del tipo *fly-by*, es decir, de paso, por lo que no es necesario notificar que se ha alcanzado y, tampoco, sobrevolarlo. En este caso, el tramo de aproximación inicial finaliza con un giro, lo que refuerza el hecho de que se deba pasar por dicho punto y no sobrevolarlo.

La normativa recomienda que la derrota del tramo sea la misma que la del tramo de aproximación final, que coincide con la de pista. Pese a la presencia de una zona montañosa a sobrevolar en la aproximación intermedia, no existe un gran riesgo en dicho sobrevuelo, por lo que se mantendrá la derrota de pista.

En lo referente a la longitud del tramo, debe presentar un tramo horizontal de, por lo menos, 3.7 km antes del FAP, habiéndose respetado esta distancia. En cuanto a la longitud total, el mínimo se encuentra en 9.3 km, pero el óptimo es de 19 km. Además del tramo horizontal de 3.7 km, se añade un tramo con la pendiente recomendada de 10.3 km. De este modo, la longitud total es de 14 km. Esto se debe a la presencia de la zona montañosa ya mencionada, así como a la intención de evitar la aproximación frustrada de la pista 36.

La norma establece que la pendiente máxima del subtramo en pendiente del segmento de aproximación intermedio es del 5.2%, es decir, de 2.98°. La altitud se calcula de forma que no se supere la pendiente, pero sí se dé en incrementos de 50 m.

Como resultado se obtiene un tramo intermedio horizontal de 3.7 km antes de la llegada al FAP, precedido por un tramo de 10.3 km y de pendiente de 2.78°, con un IF a una altitud de 1100 m con respecto al umbral de pista (500 m más alto que el FAP).

Finalmente, respecto al margen de franqueamiento de obstáculos, con un valor de 150 m en el área primaria y en el borde inferior de la secundaria hasta reducirse a 0 m en el borde exterior, se comprueba el cumplimiento con la normativa.

1.8.3. Tramo de aproximación final

Se trata en la presente sección del diseño del tramo final de la aproximación para la pista 18. Este tramo finaliza con la aeronave o bien aterrizando o realizando la aproximación frustrada. Comienza en el punto FAP (*Final Approach Point*), del que ya se ha hablado anteriormente, y deben cumplirse en él una serie de requerimientos establecidos por la normativa.

En el caso de estudio, se establece el FAP como un *waypoint* del tipo *fly-over*, es decir, de sobrevuelo y con notificación obligatoria. Esto implica que, por motivos de seguridad, el punto debe ser sobrevolado por la aeronave, que debe notificarlo al control de tráfico aéreo o autoridad pertinente.

La longitud óptima establecida por la norma es de 9.3 km, siendo la máxima de 18.4 km. La longitud final de este tramo es de 11 km.

Hay una recomendación que dice que las altitudes mínimas deberían darse en incrementos de 50 m o 100 ft, según corresponda. Con esto, se establece la altitud del FAP a 600 m respecto al umbral de pista. Esto hace que la pendiente de la senda de planeo sea de 3.12° . En la comprobación del franqueamiento de obstáculos, se observa que realizar la operación de este modo es posible.

La Imagen 1.36 se presenta el resultado ya descrito. Su diseño se realiza en el fichero de Matlab "Apch18.m", incluyendo los tres tramos ya descritos anteriormente: aproximación inicial, intermedia y final.

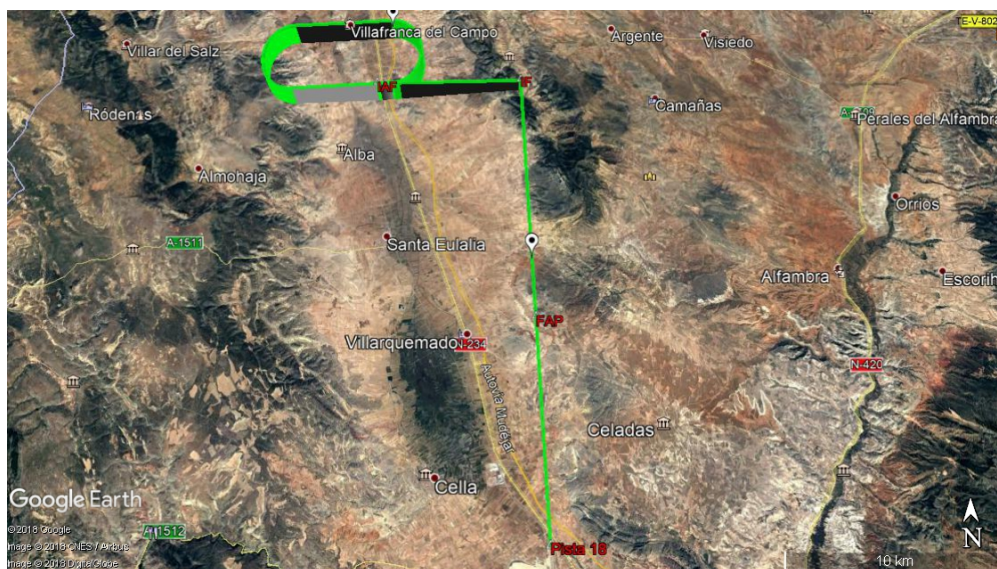


Figura 1.36: Aproximación a la pista 18

Por su parte, el perfil de elevación de la ruta generado con Google Earth se muestra en la Imagen 1.37.



Figura 1.37: Perfil de elevación de la aproximación a la pista 18

Descripción de las OAS

Se procede a presentar las superficies OAS (*Obstacle Assessment Surface*) elaboradas para la pista 18 del aeropuerto de Teruel.

Como ya se ha mencionado, para su cálculo se ha hecho uso del *software* OAS de los PANS-OPS que proporciona las coordenadas, según el sistema de coordenadas local ya expuesto, de los puntos que conforman las mencionadas superficies, siempre y cuando los valores introducidos se encuentren dentro de rangos.

Para comprender el uso del soporte técnico se adjunta la Imagen 1.38, a partir de la cual se explicará cómo funciona.

En primer lugar, se debe introducir la categoría de la aproximación que es del tipo APV II. Se ha elegido esta categoría por resultar más sencilla su validación. A continuación se debe introducir la trayectoria de planeo (GS), siempre con incrementos de 0.1° . Esta aproximación se ha diseñado para una senda de planeo de 3.1° , que es la pendiente empleada.

La distancia entre el localizador y el umbral se debe introducir, ya que el soporte ha sido diseñado para una aproximación del tipo ILS, pero, al tratarse del SBAS, no se trata de una distancia real. Se elige un valor de 2000 m como valor razonable.

Como altura del punto de referencia o RDH, se ha tomado el que viene por defecto en el programa, es decir, 15 m. En cuanto a la anchura del rumbo en THR, al tratarse de un término que hace referencia a la anchura del sector, se ha dejado el valor por defecto de 210 m.

Finalmente, los datos de la aeronave introducidos, se indica que la pendiente de ascenso de la aproximación frustrada (M/APP CG) es del 2.5%, siendo la categoría de la aeronave de tipo D.

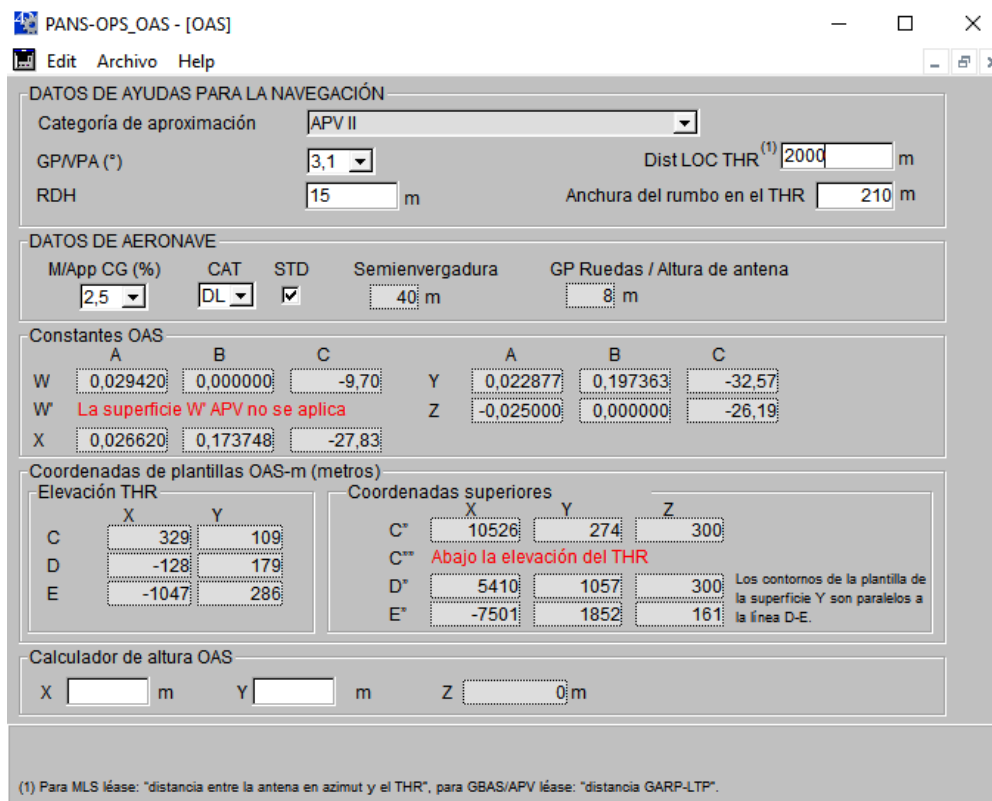


Figura 1.38: Soporte lógico de OAS de los PANS-OPS

El programa devuelve las constantes OAS de las ecuaciones que describen las superficies, así como las coordenadas de las plantillas OAS en metros. La Imagen 1.39 muestra donde se sitúa cada punto.

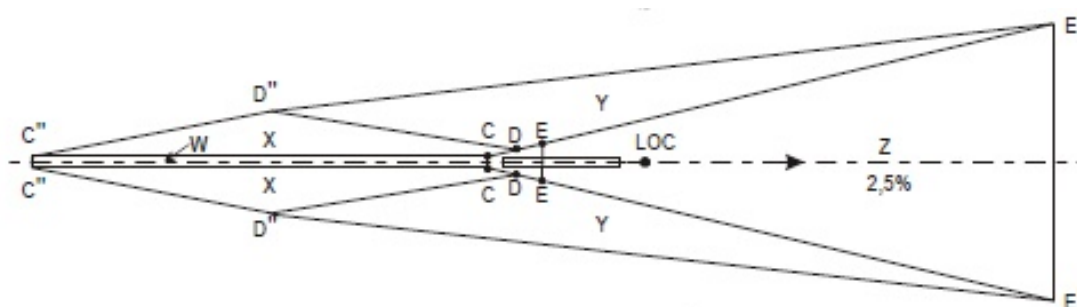


Figura 1.39: Plantilla de superficies OAS en 2D

Con los puntos dados, las coordenadas de los cuales en el espacio se conocen, se dibujan las superficies OAS con el programa elaborado para ello en Matlab. La Tabla 1.5 recoge las coordenadas obtenidas con el *software* mencionado.

	C	D	E	C''	D''	E''
x (m)	295	-128	-1047	10492	5410	-7555
y (m)	101	166	273	265	1044	1852
z (m)	-	-	-	300	300	162

Tabla 1.5: Coordenadas de los puntos que definen las OAS

En los anexos se pueden encontrar los ficheros de Matlab empleados para dibujar las OAS de la pista 18. Concretamente, el nombre de dicho archivo es "OAS18APVII.m". De su ejecución se generan 7 ficheros de tipo .kml que se corresponden con los dibujos en Google Earth de cada superficie. La Imagen 1.40 muestra el resultado de la ejecución de dicho programa, es decir, las superficies OAS para la pista 18 del aeropuerto de Teruel.

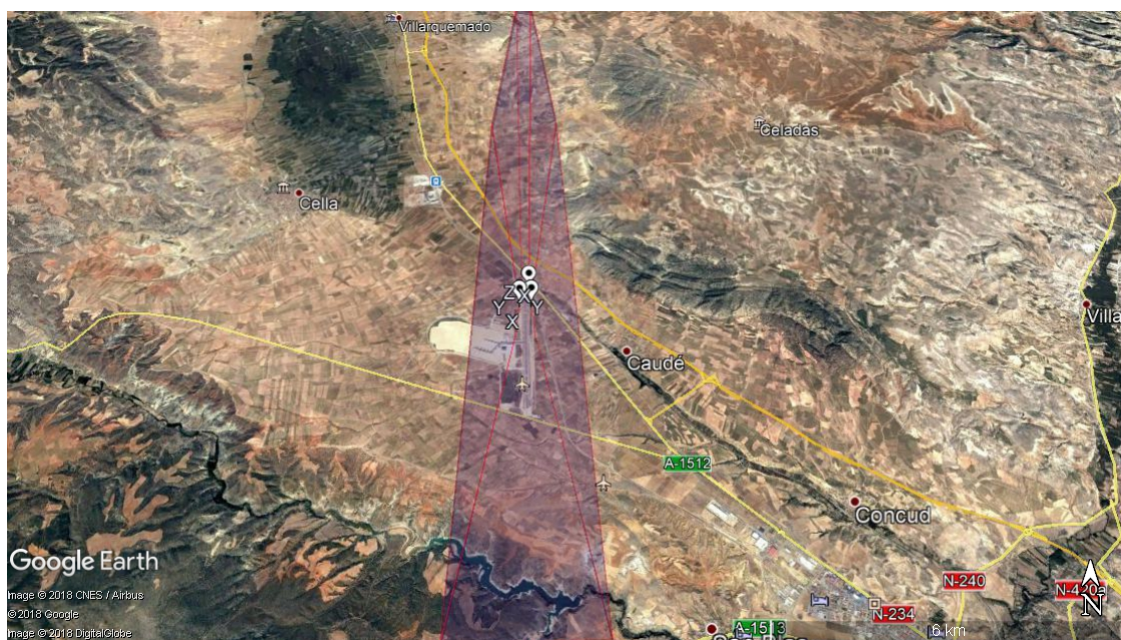


Figura 1.40: Superficies OAS para la pista 18

Las superficies OAS son las que aparecen en la figura delimitadas por líneas y en colores violáceos. Se han diseñado siguiendo lo ya mencionado anteriormente.

Descripción de la OCA/H

Como ya se ha mencionado en la Sección 1.7.4 en el subapartado dedicado a la OCA/H, se trata de la menor altitud o altura por encima de la elevación del umbral de pista empleada para establecer el cumplimiento del criterio mínimo de franqueamiento de obstáculos.

Para su cálculo, se necesitan conocer tanto las coordenadas de los obstáculos del aeródromo, como las OAS. Las coordenadas se han obtenido a partir de la web de ENAIRE y las

OAS ya han sido diseñadas anteriormente.

Haciendo uso del soporte lógico de OAS se puede comprobar si dichos obstáculos perforan o no las superficies OAS. Esta opción se encuentra al final de la interfaz bajo el título de "Calculador de altura OAS". El programa devolverá la altitud de la OAS en el punto de coordenadas dadas y así se podrá comprobar si hay o no penetración. Con estos datos, se puede proceder a calcular la OCA/H. Además, el valor de la OCA/H varía según la categoría de la aeronave. Se presenta únicamente la OCA/H para la categoría D, por ser la más restrictiva, aunque se ha calculado para las categorías inferiores que pueden hacer uso del aeropuerto.

El total de obstáculos estudiados en la operación realizada es de 12, un número bastante reducido. Entre ellos se encuentran tendido eléctrico, antenas, postes o puentes. Para ilustrar los obstáculos presentes en el aeródromo se recogen en la Tabla ?? mostrada más adelante. Es importante destacar que la elevación del obstáculo hace referencia a su altura sobre el nivel del mar, mientras que su coordenada z es la altitud con respecto al umbral de pista. Por su parte la altura equivalente del obstáculo es un dato que se calcula, exclusivamente, para aquellos que se sitúen en la zona de aproximación frustrada. Se considera que ésta empieza 900 m antes del umbral de pista. La fórmula empleada para su obtención es la Ecuación 1.11.

$$h_a = \frac{h_{ma} \cdot \cot Z + (X_E + x)}{\cot Z + \cot \theta} \quad (1.11)$$

Donde:

- h_{ma} : Altura del obstáculo.
- Z: Ángulo de la aproximación frustrada (2.5 %).
- X_E : $900 + (38/\tan \theta)$
- x: Distancia al umbral.
- θ : Ángulo de planeo (3.1°).

A partir de estos datos se puede establecer cuál es el obstáculo determinante en la aproximación, es decir, el que presente una mayor altura o altura equivalente si se encuentra en la zona de frustrada. Para el cálculo de la OCA/H, se debe sumar al valor de esta altura el margen de vuelo de baroaltímetro que, como ya se ha mencionado, varía en función de la categoría de la aeronave. Hay que realizar una corrección por altura en dicho margen, ya que la elevación del aeródromo es superior a 900 m (1005 m). Se añadirá un 2 % por cada 300 m. En el caso de estudio, el margen es de 49.34 m.

Con los datos ya mencionados, se elabora la mencionada tabla. Los cálculos realizados en su versión más detallada, se encuentran adjuntos en el Excel adjunto "OAS APV II - Carmen Furquet Gascón.xlsx" y en el fichero de Matlab "Obstaculos.m".

OBSTÁCULO					OAS		Altura equiv. [m]	OCA [m]
Nº	Elevación [m]	x [m]	y [m]	z [m]	Altura [m]	Perfora		
1	1046.68	2044.13	312.02	83.10	21.60	No	-	70.94
2	1062.51	3487.76	-869.81	221.51	35.85	No	-	85.19
3	1062.30	3507.60	-1065.14	260.51	35.85	No	-	85.19
4	1026.88	959.19	200.95	34.92	16.20	No	-	65.54
5	1026.31	1110.79	43.57	23.98	16.20	No	-	65.54
6	1013.74	-300.41	161.49	0.00	7.90	Sí	42.02	91.37
7	1016.66	-321.35	160.72	0.00	10.45	Sí	43.49	92.83
8	1032.86	-2271.92	186.94	30.61	12.30	No	13.53	62.87
9	1013.05	138.93	263.32	25.20	4.50	No	-	53.84
10	1022.64	-1704.08	664.78	62.27	4.50	No	-	53.84
11	1033.61	-3379.89	1035.81	97.16	4.50	No	-	53.84
12	1025.66	935.93	477.64	85.73	4.50	No	-	53.84

Tabla 1.6: Tabla de obstáculos para el cálculo de la OCA/H

Se puede observar que el obstáculo determinante es el que lleva por número el 7 y que se corresponde con una antena.

De este modo, se obtienen los siguientes valores para la OCA/H, en pies y metros, recogidos en la Tabla 1.7. Se trabajará con una OCA de 92.83 m.

	OCA D baroaltímetro [m]	OCA D baroaltímetro [ft]	OCH D baroaltímetro [m]	OCH D baroaltímetro [ft]
CAT I	1097.83	3601.81	92.83	304.56

Tabla 1.7: Valores de la OCA/H para la aproximación a la pista 18

1.8.4. Aproximación frustrada

También se ha realizado el diseño de la aproximación frustrada para que, en caso de que a la altura de decisión el piloto no sea capaz de realizar el aterrizaje, pueda ser abortado (frustrar) y retomarse la aproximación en el IAF, es decir, desde el principio.

El comienzo de la aproximación frustrada se da en el SOC (*Start Of Climb*), momento en el que la aeronave comienza a ascender. El cálculo de dicho punto se realiza como la intersección entre el plano GP', paralelo a la trayectoria de planeo y con origen a -900 metros

con respecto al umbral, alcanza la altitud de la OCA/H.

Según la norma, el tramo de precisión de la aproximación frustrada es aquel en el que se sobrevuela la superficie Z de las OAS hasta que ésta alcanza una altura de unos 300 m, aproximadamente. No obstante, dicho tramo puede extenderse más. En el caso de estudio, se realizará una aproximación frustrada con viraje y, dicho viraje deberá de posicionar a la aeronave en el IAF de nuevo. Para realizar el primer giro, se ha decidido extender el tramo más allá de las OAS por seguridad.

La pendiente óptima de la aproximación frustrada es, según la norma, del 2.5 %, lo que equivale a 1.43° , acabando el último tramo de dicha aproximación en el IAF, como ya se ha mencionado.

De acuerdo con lo ya expuesto, la aproximación frustrada se ha diseñado en 3 tramos con 2 giros de 90° , a los que le seguiría otro para volver al IAF y, así, retomar la aproximación.

El primer tramo es el que sobrevuela y sobrepasa las superficies de seguridad OAS y cuya longitud viene determinada desde el SOC hasta el *waypoint* del tipo *fly-by* empleado para realizar un primer giro. Dicha longitud es de 18 km y su altitud es de 600 m sobre el umbral de pista. La pendiente, al tratarse del primer tramo, es de 1.64° .

El segundo tramo es horizontal y su objetivo es, simplemente, orientar la aeronave hacia un punto en el que se pueda realizar un nuevo giro de 90° hacia el IAF. Su longitud es idéntica a la del tramo de aproximación inicial, es decir, 10.5 km.

El tramo final se diseña para guiar a la aeronave hasta el punto IAF del tipo *fly-by*. Se debe alcanzar, además, la altura a la que se encuentra este punto, por lo que este tramo es de ascenso. Su longitud es de 43 km, la suma de los tramos final, intermedio e inicial de la aproximación frustrada, con una pendiente de 1.27° . De este modo, se alcanza la altura de 1550 m sobre el umbral de pista, lo que supone un ascenso de 950 m.

De nuevo, empleando el fichero de Matlab "Apch18.m", se dibuja en Google Earth la aproximación frustrada recogida en la Imagen 1.41.

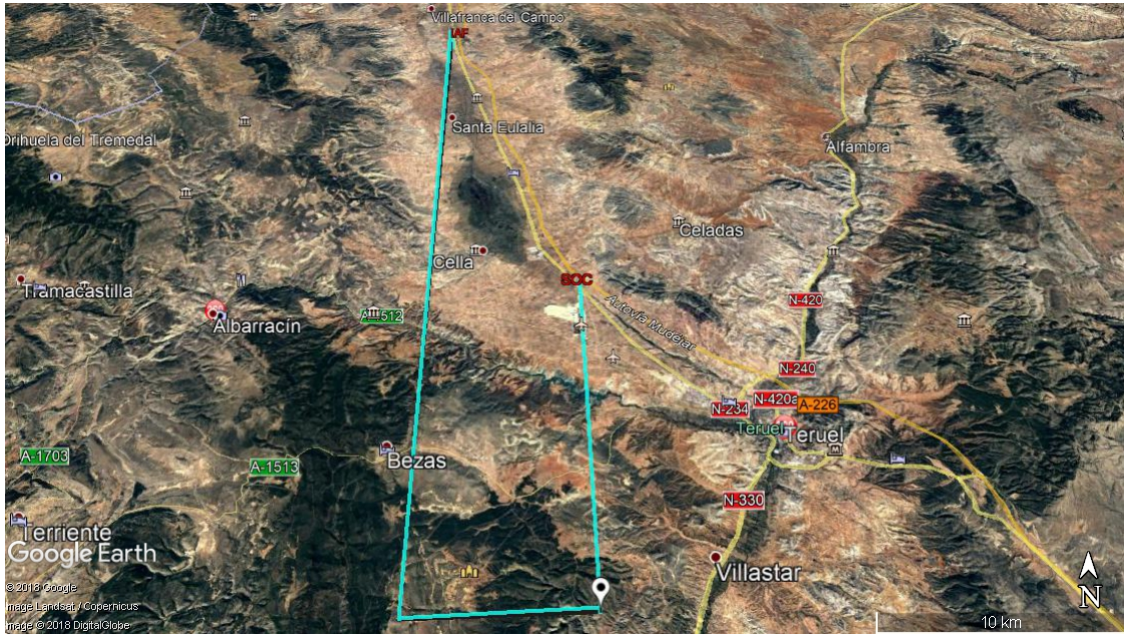


Figura 1.41: Aproximación frustrada para la pista 18

Por su parte, el perfil de elevación de la ruta de la aproximación frustrada es la mostrada en la Imagen 1.42.

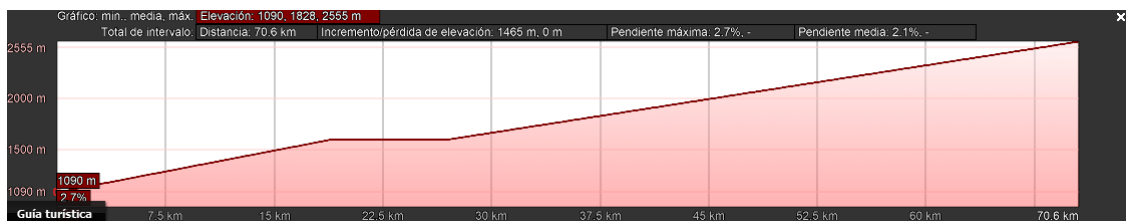


Figura 1.42: Perfil vertical para la aproximación frustrada de la pista 18

1.8.5. Resumen de la ruta

A modo ilustrativo, se expone en la Tabla 1.8 la descripción de los puntos más importantes que la integran, especificando sus coordenadas, altitud y simbología de los puntos en la carta aeronáutica en la que se situarían.

La ruta completa, junto con las OAS, se muestra en la Imagen 1.43.

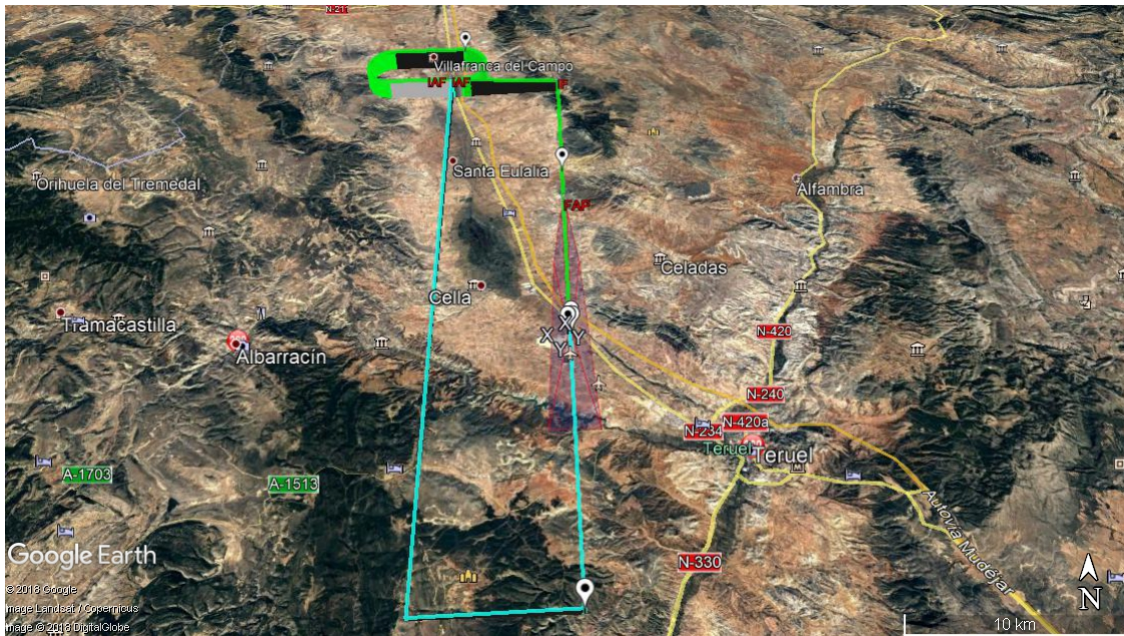


Figura 1.43: Ruta completa de aproximación para la pista 18

Punto de la ruta	Coordenadas	Altitud [m]	Símbolo
IAF	N 040° 38' 51.98'' W 001° 19' 20.36''	2555	◆
IF	N 040° 39' 06.49'' W 001° 13' 40.13''	2105	◇
FAP	N 040° 31' 28.72'' W 001° 13' 20.95''	1605	◆
THR RWY 18	N 040° 25' 29.04'' W 001° 13' 05.89''	1005	-
SOC	N 040° 25' 55.26'' W 001° 13' 06.99''	1097.83	-
P1 frustrada	N 040° 15' 40.47'' W 001° 12' 41.24''	1605	◆
P2 frustrada	N 040° 15' 25.96'' W 001° 19' 20.36''	1605	◇

Tabla 1.8: Resumen de la ruta de aproximación a la pista 18

1.8.6. Superficies de protección horizontal de la ruta

La aproximación se ha diseñado con una protección lateral de 1 NM, o 1852 m, a cada lado, ya que se trata del tipo RNP 1. Esta protección lateral está presente hasta el comienzo de las superficies OAS. Para el hipódromo de espera, se ha diseñado el área básica de acuerdo

a la normativa y empleando el método simplificado del rectángulo.

Como ya se ha visto en la Sección 1.7.3, por motivos de seguridad, la aproximación frustrada presenta una protección lateral de 2 NM una vez se ha sobrepasado la OAS. Este valor equivale a 3704 m a cada lado de la ruta. El aumento se debe a que, al tratarse de un tramo crítico de la operación y contemplando la pérdida de precisión, se decide colocar el diseño del lado de la seguridad.

Las Imágenes 1.44, , 1.45, 1.46 y 1.47, se muestran las protecciones laterales para cada tramo de la ruta. Se puede observar el aumento del margen de seguridad de la aproximación frustrada con respecto a la aproximación en sí misma, así como en las superficies de protección para sortear obstáculos.

No obstante, si se siguen los requerimientos para la aproximación del tipo SBAS equivalente a ILS CAT I, se obtiene el resultado mostrado en las Imágenes 1.48, 1.49, 1.50 y 1.51. Para ello se han tomado los requerimientos de acuerdo a la normativa expuesta en el Doc. 8168 de OACI.

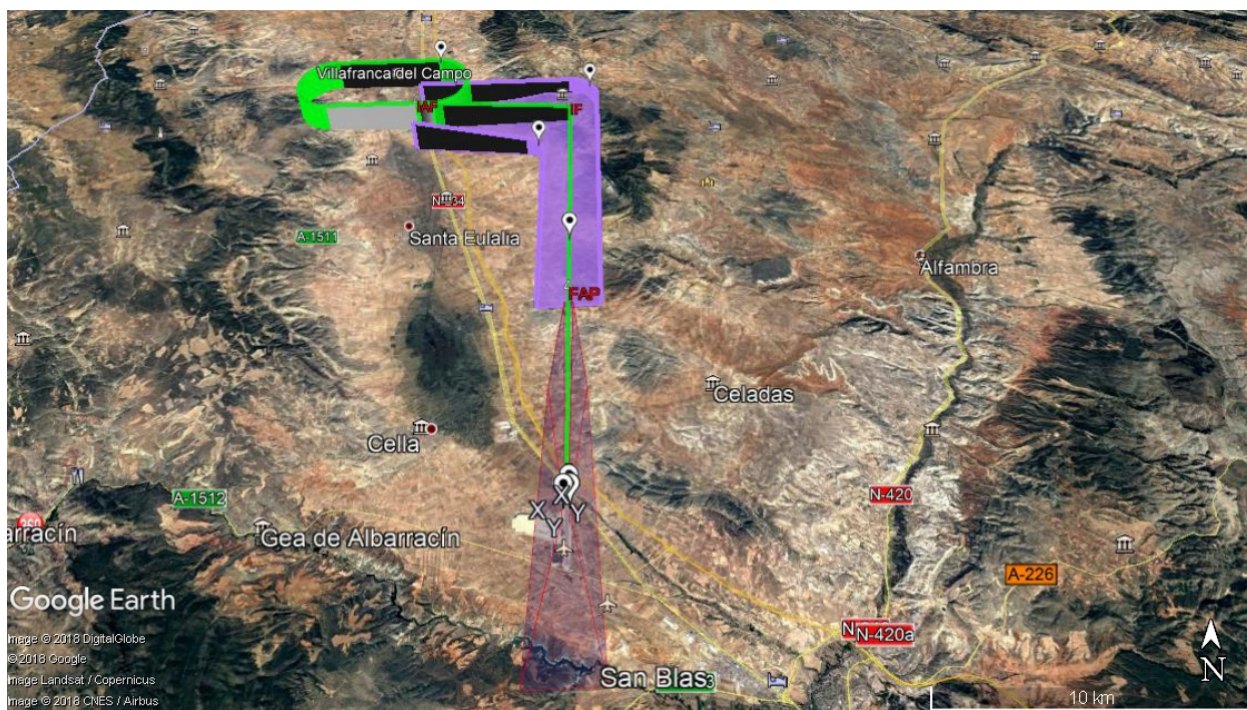


Figura 1.44: Protección lateral para la aproximación a la pista 18

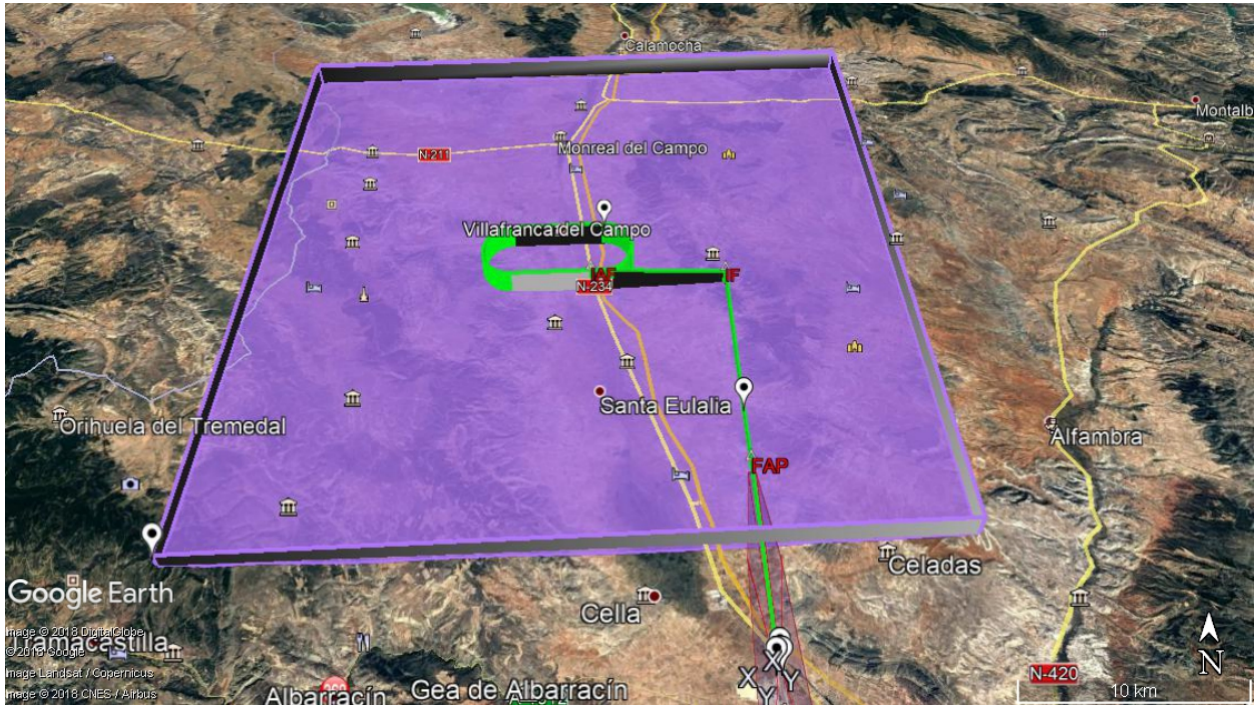


Figura 1.45: Protección lateral para la espera en la pista 18

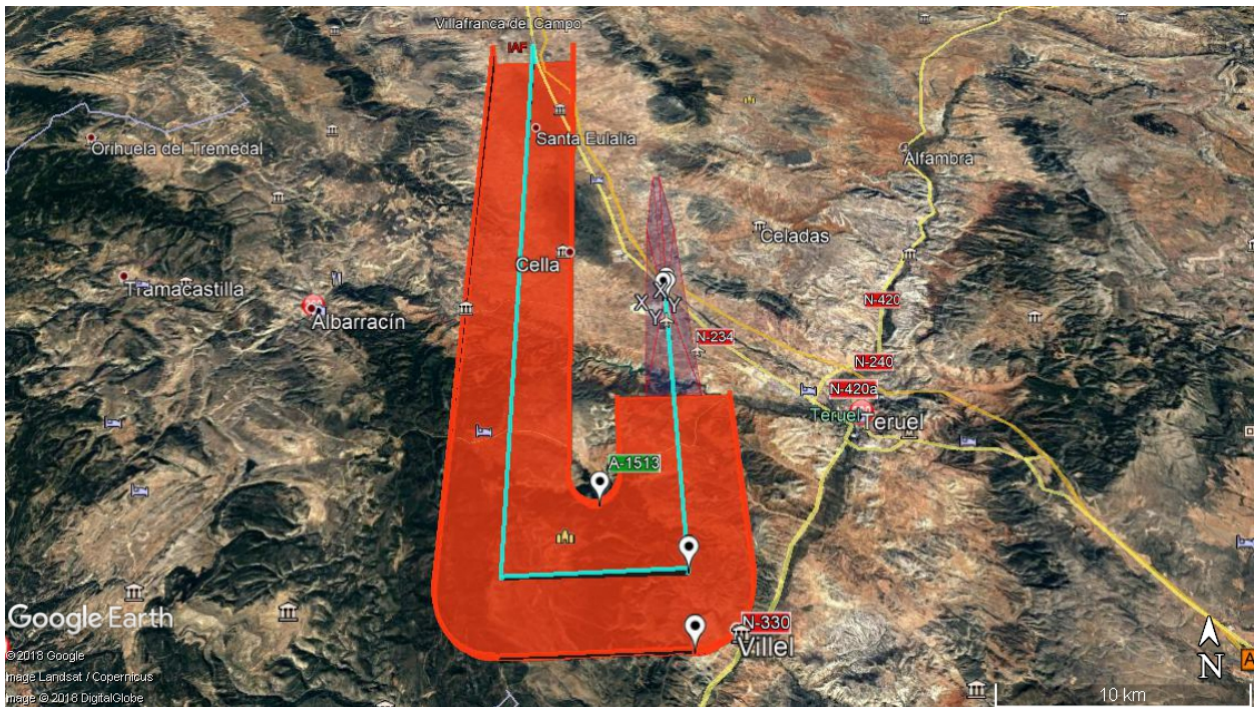


Figura 1.46: Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 18

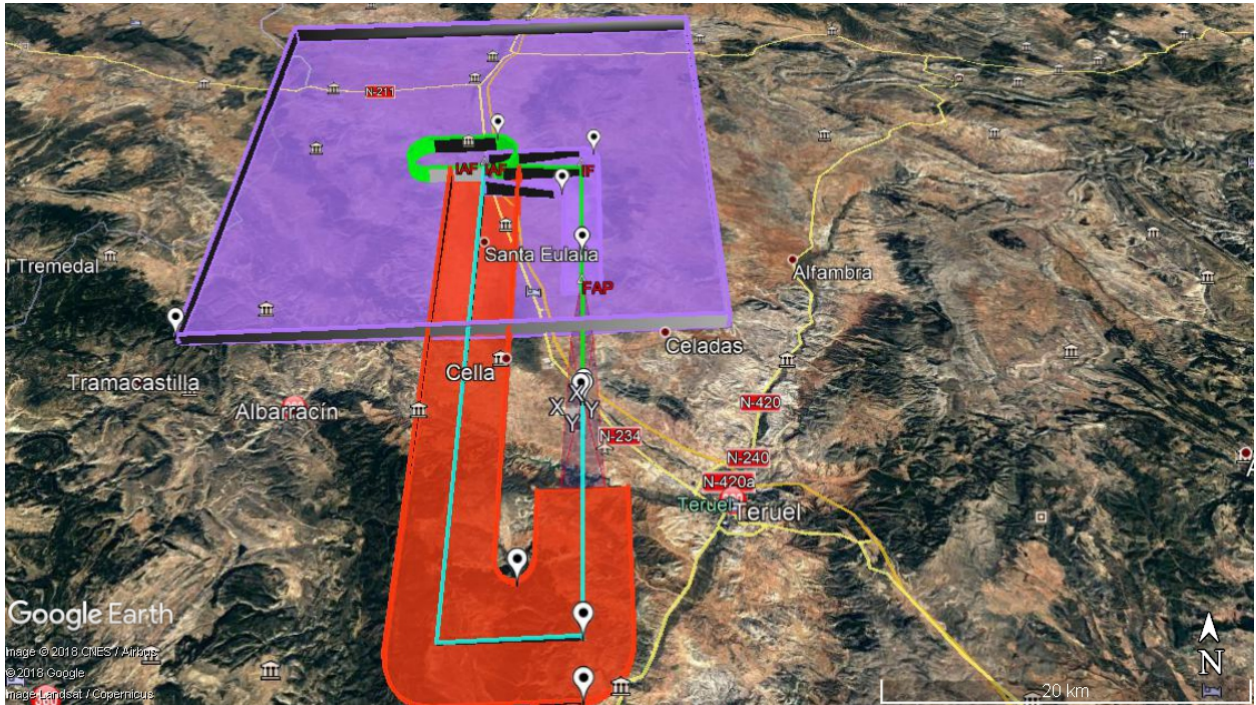


Figura 1.47: Protección lateral para la aproximación completa a la pista 18

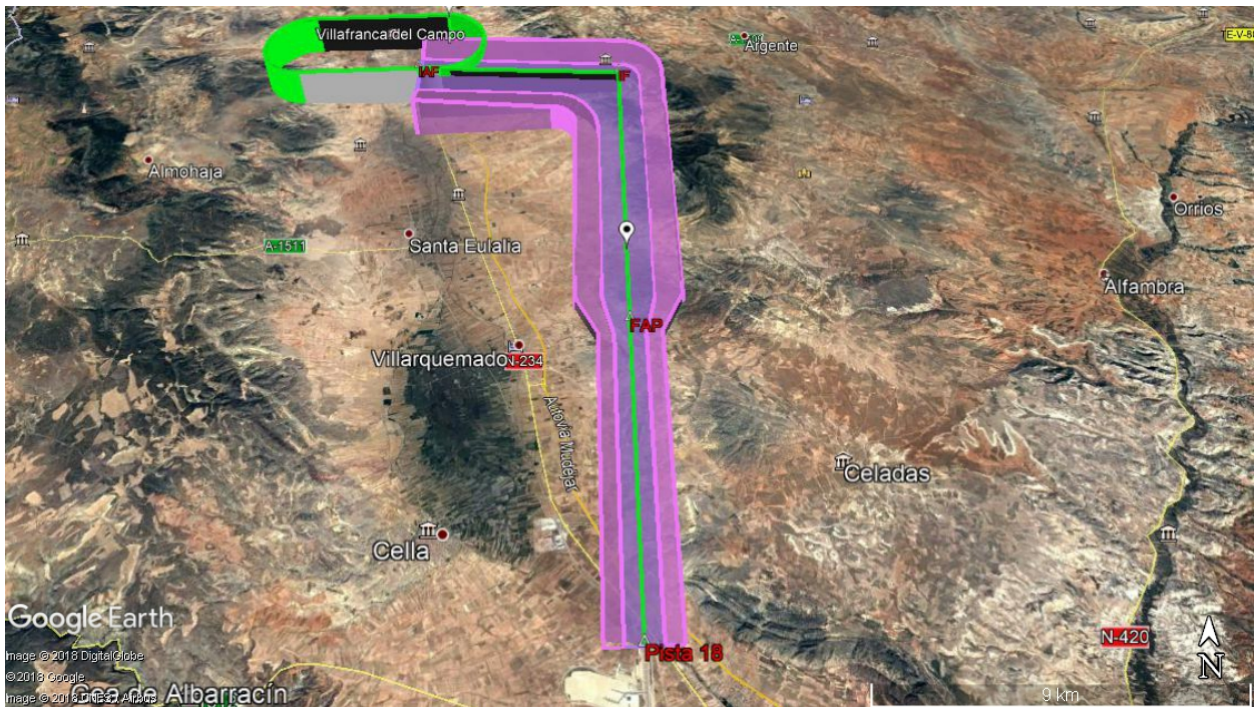


Figura 1.48: Protección lateral para la aproximación a la pista 18

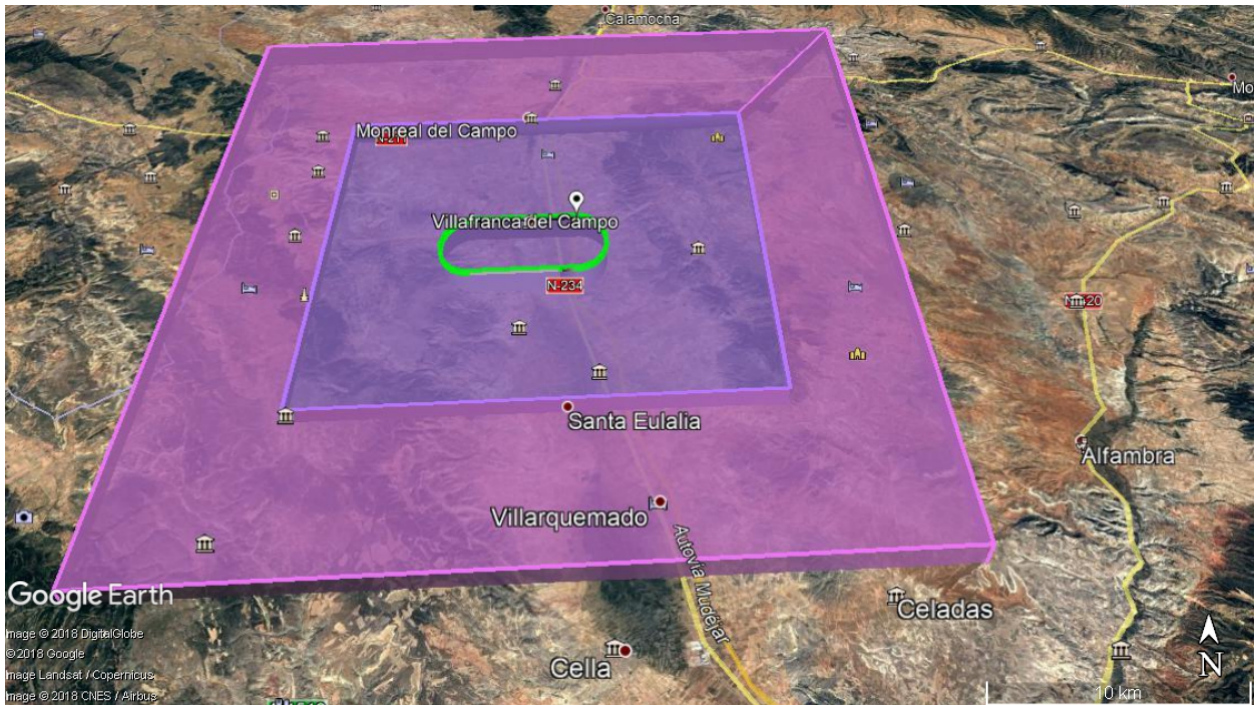


Figura 1.49: Protección lateral para el hipódromo de esperas de la pista 18



Figura 1.50: Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 18

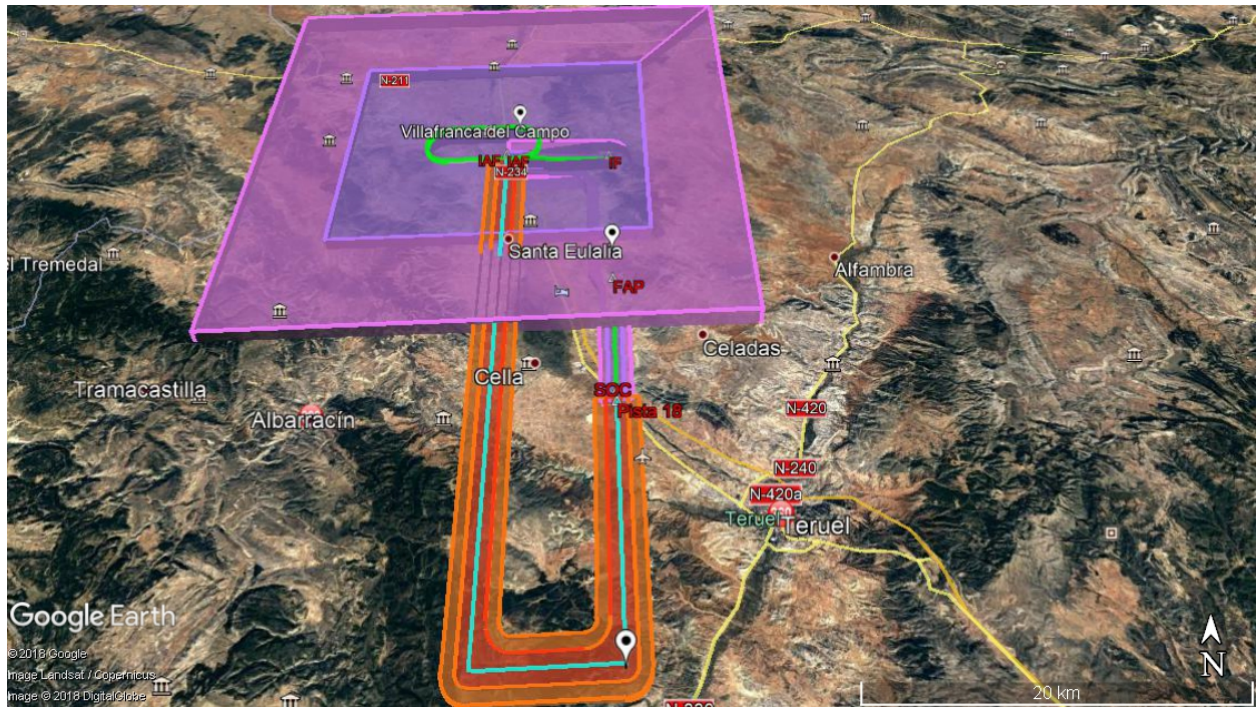


Figura 1.51: Protección lateral para la aproximación completa a la pista 18

1.9. Construcción del procedimiento de aproximación para la pista 36

En el presente apartado se muestra el diseño de la aproximación bajo los requerimientos de RNP APCH de LPV-200 y uso de SBAS para la pista 36 del aeropuerto de Teruel. Como ya se ha visto en la Sección 1.8, la aeronave elegida es de categoría D, marcada por el Boeing 747-800. La altitud de la cabecera de pista es de 1026 m sobre el nivel del mar.

Se diseñan las fases de aproximación inicial, intermedia, final y frustrada, así como sus superficies de protección, siguiendo las generalidades ya expuestas, entrando en detalle en su diseño.

Se adjuntan los ficheros de Matlab empleados en dicho diseño, además de la mencionada descripción. Gracias a estos ficheros ha sido posible la representación en Google Earth de las rutas.

1.9.1. Tramo de aproximación inicial

Como ya se ha explicado en la Sección 1.8.1, la aproximación inicial es el tramo comprendido entre el IAF y el IF, ambos *waypoints* de paso o *fly-by*. No obstante, se establece de nuevo que el IAF sea un punto de notificación obligatoria, para asegurar la operación.

En cuanto al rumbo, resulta necesario que la aeronave se alinee con la pista conforme desciende. Con este propósito, se diseña el tramo inicial de aproximación, que sitúa al avión en la derrota de la aproximación intermedia, la cual coincide con la de pista.

Las especificaciones del tramo quedan determinadas según lo expuesto a continuación. Su longitud es de 13 km, encontrándose dentro de la norma. La pendiente de descenso es de 2.20° , alcanzando una altitud en el IAF de 1500 m sobre el umbral de pista. También cabe mencionar el viraje realizado para incorporarse a dicho tramo intermedio. Para la aproximación a la pista 36 es de 90° .

De nuevo, se cumple el franqueamiento de obstáculos de 300 m en el área primaria, tomando el mismo valor en el borde interior del área secundaria y reduciéndose a cero en el exterior.

Hipódromo de espera

Análogamente al procedimiento de diseño seguido para la pista 18, se procede a realizar la misma tarea para la pista 36. De nuevo, se han seguido las indicaciones que da la norma recogida en el Doc 8169 de OACI.

Los parámetros establecidos para su diseño son:

- **Altitud:** Se ha seleccionado la altitud del IAF para situar el hipódromo de espera, es decir, 1500 m sobre el umbral de pista.
- **Velocidad:** Se ha elegido la mayor de las velocidades para la categoría D que es, en este caso, de 306 km/h. Se debe tener en cuenta que se trata de la velocidad indicada o IAS. Para obtener la verdadera o TAS, se ha calculado el coeficiente de conversión K mediante una interpolación de la tabla ya mostrada en la Imagen 1.32. El valor de K es, entonces, 1.1639 adimensional. De este modo, la velocidad TAS es de 356.15 km/h.
- **Velocidad del viento:** Se ha hecho uso de la Ecuación 1.5 y se ha obtenido una velocidad de 117.91 km/h para la altitud de 2555 m sobre el nivel del mar.
- **Tiempo:** El tiempo cronometrado para el tramo de alejamiento es de 1 minuto.
- **Velocidad angular:** La velocidad angular se calcula de acuerdo a la Ecuación 1.7 y devuelve un valor de $2.65^\circ/\text{s}$.
- **Radio de giro:** El radio de giro se calcula según la Ecuación 1.8 y arroja un valor de 2.14 km.
- **Longitud del tramo de alejamiento:** De acuerdo a la velocidad y al tiempo cronometrado de alejamiento, se obtiene una longitud de 5.94 km, sin incluir las tolerancias técnicas de vuelo que tienen en cuenta el tiempo de reacción del piloto, de estabilización del ángulo lateral y de alejamiento.

Con estos parámetros es posible diseñar el circuito de espera en forma de hipódromo. Por su parte, el franqueamiento de obstáculos debe ser de 300 m en el área primaria o básica. Para el área secundaria, se toma el mismo valor en el borde interior y se reduce a cero en el exterior.

1.9.2. Tramo de aproximación intermedio

El tramo de aproximación intermedio queda comprendido entre el IF y el FAP, como ya se ha visto en la Sección 1.8.2. El IF es un *waypoint* de paso, sin necesidad de notificarse

la posición en el mismo. No obstante, el FAP es de notificación obligatoria, así como de sobrevuelo o *fly-over*, diseñando así la operación del lado de la seguridad.

La geografía del aeródromo dificulta, en este caso, la aproximación. Esto se debe a la orografía montañosa, así como la presencia de la ciudad de Teruel donde la elevación es menor. Por ello, se ha establecido la aproximación intermedia con la misma derrota que la pista pero con una longitud de 13 km, 1000 m menor que la del mismo tramo para la pista 18. De dicha longitud, 3.7 km se han establecido en horizontal, dado que así lo exige la norma. Los 9.3 km restantes presentan una cierta pendiente.

Siguiendo la caracterización del tramo realizada en la pista 18, se ha establecido la altura del IF sobre el umbral de pista en 1000 m. La pendiente para alcanzar dicha altura es de 2.77° .

Como resultado de los cálculos realizados, el tramo intermedio se encuentra a 2026 m sobre el nivel del mar, con la misma derrota que la pista 36 y suponiendo un ascenso de 450 m con respecto al FAP.

El margen de franqueamiento de obstáculos es de 150 m en el área primaria y de 150 m en el borde de la secundaria, hasta alcanzar un valor de 0 en el borde exterior de la misma. Se cumple con la normativa, según se ha comprobado.

1.9.3. Tramo de aproximación final

El tramo de aproximación final comprende desde el FAP hasta el aterrizaje en pista en caso de no realizarse una aproximación frustrada, tal y como se explica en la Sección 1.8.3. El FAP es un *waypoint fly-over* o de sobrevuelo con notificación obligatoria de la posición.

Se establece la longitud del tramo en 10.5 km, 500 metros menos que el mismo tramo de aproximación final a la pista 18. El valor mencionado se encuentra entre el valor óptimo de 9.3 km y el máximo de 18.4 km. Se ha diseñado del modo mencionado por no suponer ventajas su alargamiento.

La pendiente del tramo es de 3° , del mismo valor que la óptima y alcanzando una altitud de 550 m sobre el umbral de pista.

Para obtener la Imagen 1.52 se ha recurrido al fichero de Matlab de nombre "Apch36.m" y en ella se incluyen los tres tramos de la aproximación a la pista 36: inicial, intermedio y final.

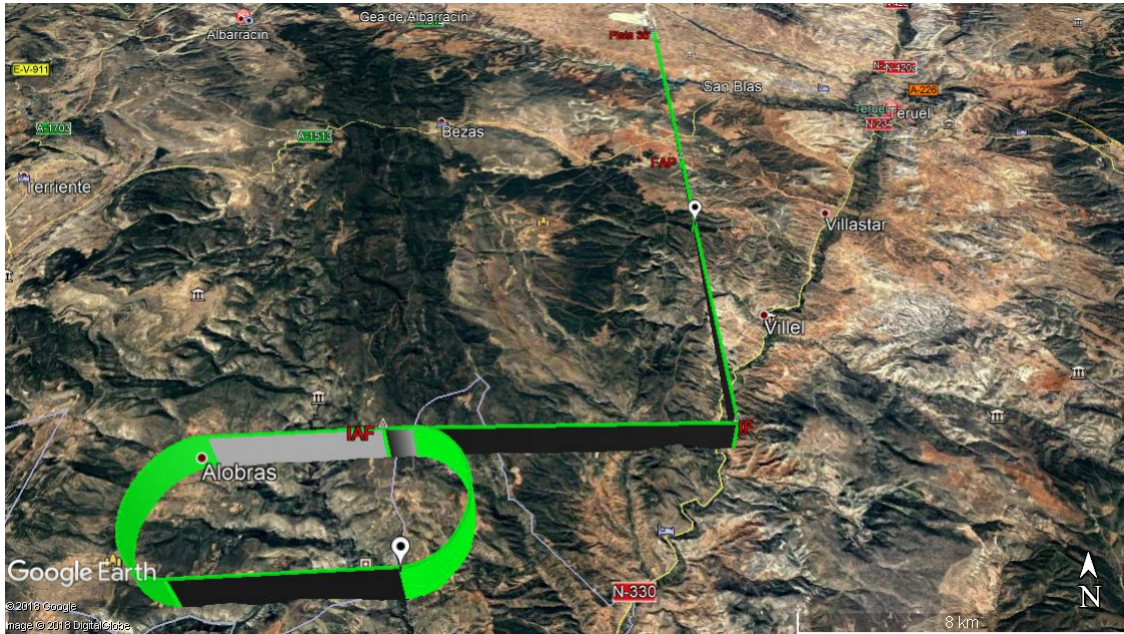


Figura 1.52: Aproximación a la pista 36

El perfil de elevación de la ruta generado con Google Earth se recoge en la Imagen 1.53.

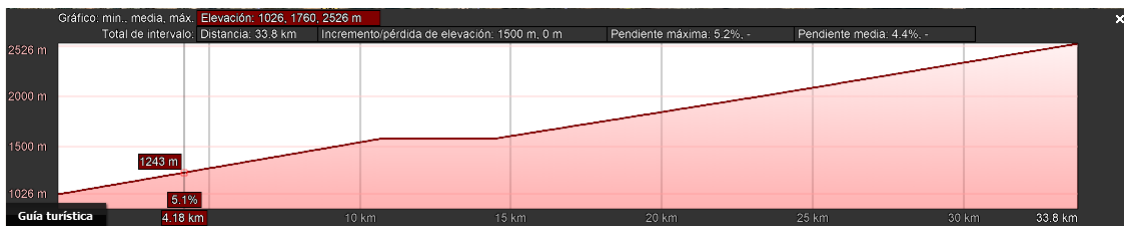


Figura 1.53: Perfil vertical de la aproximación a la pista 36

Descripción de las OAS

Tabién es importante la representación de las OAS para la pista 36 del aeropuerto de Teruel.

Como ya se ha explicado en la Sección 1.8.3, se calculan a partir del soporte lógico OAS de los PANS-OPS, de forma completamente análoga a la realizada para la pista 18.

Los datos introducidos en el programa para la obtención de las coordenadas son:

- Se establece APV II por los motivos ya mencionados para la pista 18.
- La trayectoria de planeo es, en este caso, de 3° .
- La distancia al localizador se establece en 2000 m, una distancia razonable.

- La altura del punto de referencia (RDH) es, de nuevo, la sugerida por el programa.
- La pendiente ascensional de la aproximación frustrada se establece en 2.5 %.
- La categoría de la aeronave es de tipo D.

Las Imágenes 1.38 y 1.34 muestran tanto el soporte como el esquema de las superficies OAS. Por su parte, la Imagen 1.33 refresca el sistema de coordenadas empleado en el cálculo y representación de las superficies. Las coordenadas se recogen en la Tabla 1.9.

	C	D	E	C''	D''	E''
x (m)	316	-133	-1052	10842	5590	-7522
y (m)	99	167	272	280	1076	1852
z (m)	-	-	-	300	300	161

Tabla 1.9: Coordenadas de los puntos que definen las OAS

El fichero de Matlab que dibuja las superficies en Google Earth, se encuentra adjunto y lleva por nombre "OAS36APVII.m". Al ejecutarse, genera 6 ficheros de extensión .kml que se corresponden con las superficies X, Y, W y Z.

La Imagen 1.54 muestra dichas superficies resultado de la ejecución del programa.



Figura 1.54: Superficies OAS para la pista 36

Descripción de la OCA/H

Como ya se ha mencionado antes, la OCA/H (*Obstacle Clearance Altitude/Height*) es la menor altitud o altura por encima de la elevación del umbral de pista empleada para establecer el cumplimiento del criterio mínimo de franqueamiento de obstáculos.

El cálculo de la OCA/H se ha realizado de manera análoga a la pista 18. Se recurre al programa de OAS de los PANS-OPS para calcular la altura de las superficies en los puntos en los que se encuentran los obstáculos. De este modo, se puede comprobar si dicho obstáculo penetra o no en las superficies.

Se debe tener en cuenta el cambio de coordenadas de los obstáculos al tratarse de la cabecera 36 en vez de la 18. Por ello, se han recalculado las coordenadas de los obstáculos para el nuevo sistema de referencia.

La fórmula para el cálculo de la altura equivalente para aquellos obstáculos que se encuentran en la superficie de frustrada es la Ecuación 1.12.

$$h_a = \frac{h_{ma} \cdot \text{Cot } Z + (X_E + x)}{\text{Cot } Z + \text{Cot } \theta} \quad (1.12)$$

Donde, como ya se ha visto, h_a es la altura del obstáculo, z es el ángulo de la aproximación frustrada (2.5%), x la distancia al umbral y θ , el ángulo de planeo (3°).

De este modo, se puede establecer el obstáculo determinante en la aproximación y sumarle el respectivo margen del baroaltímetro para aeronaves de categoría D y establecer el valor de la OCA/H.

OBSTÁCULO					OAS		Altura equiv. [m]	OCA [m]
N°	Elevación [m]	x [m]	y [m]	z [m]	Altura [m]	Perfora		
1	1046.68	-4560.70	-277.95	87.7	21.6	No	-16.40	32.95
2	1062.51	-6004.33	903.87	123.79	35.85	No	-29.32	20.02
3	1062.30	-6024.17	1099.20	124.28	35.85	No	-29.63	19.71
4	1026.88	-3475.76	-166.89	60.57	16.2	No	-2.98	46.36
5	-3627.36	-9.51	68.18	64.37	16.2	No	-5.38	43.96
6	1013.74	-2216.16	-127.43	29.08	7.9	No	11.18	60.52
7	1016.66	-2195.22	-126.66	28.56	10.45	No	13.29	62.63
8	1032.86	-244.65	-152.88	0	12.3	Sí	45.48	94.82
9	1013.05	-2655.50	-229.25	40.07	4.5	No	1.85	51.19
10	1022.64	-812.49	-630.72	74.08	4.5	No	-	53.84
11	1033.61	863.32	-1001.75	182.06	4.5	No	-	53.84
12	1025.66	-3452.50	-443.58	59.99	4.5	No	-10.77	38.57

Tabla 1.10: Tabla de obstáculos para el cálculo de la OCA

Los cálculos para hallar los valores de la tabla se encuentran en el Excel adjunto "OAS APV II - Carmen Furquet Gascón".

A partir de la tabla, se puede hallar la OCA/H al ver que el obstáculo más determinante es el número 8, cuya altura equivalente es de 45.48 m sobre el umbral de pista, obteniéndose una OCH de 94.82 m. Éste se corresponde con una antena.

En la Tabla 1.11 se recogen los valores de la OCA/H finales para el franqueamiento de obstáculos.

	OCA D baroaltímetro [m]	OCA D baroaltímetro [ft]	OCH D baroaltímetro [m]	OCH D baroaltímetro [ft]
CAT I	1120.82	3677.23	94.82	311.09

Tabla 1.11: Valores de la OCA/H para la aproximación a la pista 36

1.9.4. Aproximación frustrada

Como ya se ha mencionado, el diseño de la aproximación frustrada encuentra su objetivo en devolver al avión al IAF en caso de no poderse realizar el aterrizaje.

Para comenzar con su diseño se requiere el cálculo del SOC o *Start Of Climb*, punto en el que comienza a ascender la aeronave en caso de frustrada. Su cálculo es análogo al de la aproximación frustrada a la pista 18, ya que se halla como el punto en el que el plano GP', plano paralelo a la trayectoria de planeo de la aeronave y de origen en $x = -900$ m con

respecto al umbral, alcanza la altura de la OCA/H.

Como en el caso de la pista 18, la aproximación frustrada presenta un tramo de precisión y otro de no precisión. El primero de ellos sobrevuela las superficies de seguridad OAS y finaliza al alcanzar la superficie Z una altura de 300 m sobre el umbral. No obstante, puede extenderse más allá si resulta ventajoso o por motivos de seguridad.

Existe, de nuevo, un giro de 90° para alcanzar el cambio de rumbo necesario. Para ello, se extiende el primer tramo de la frustrada hasta sacarlo de las superficies OAS, reduciendo la complicación y riesgo de dicho giro.

La pendiente óptima de la aproximación es del 2.5 %, es decir, 1.43° , con el tramo final desembocando en el IAF. Así, se diseña la frustrada con tres tramos, incluyendo dos giros de 90° , tal y como se ha visto para el caso de la pista 18.

El primer tramo de la aproximación frustrada es aquel que sobrevuela y sbrepasa las superficies de seguridad OAS, determinando su longitud, desde el SOC hasta el *waypoint* de tipo *fly-by* en el que se inicia el primero de los giros, en 18 km. La altitud de este punto es de 550 m sobre el umbral de pista y la pendiente seguida de 1.45° . La altitud ascendida es de, realmente, 455 m, ya que es la altitud a la que se encontraba en el momento del ascenso (SOC).

A continuación, existe un tramo horizontal que sitúa a la aeronave en la zona en la que se puede realizar el segundo giro de 90° y colocarla en dirección al IAF. Su longitud es idéntica a la recorrida en dirección y para el IAF, es decir, 13 km.

El tramo final es el que sitúa a la aeronave en el IAF, como ya se ha mencionado, para reiniciar la aproximación a la pista 36. Su longitud es de 41.5 km, sumándose los tramos final, intermedio y el tramo de precisión de la aproximación frustrada. La pendiente que mantiene la aeronave es de 1.31° y asciende hasta una altura de 1500 m sobre el umbral de pista, es decir, a la altura a la que se sitúa el IAF. Esto supone un incremento de 950 m.

Para dibujar la aproximación frustrada se ha recurrido al mismo fichero que para el diseño de la aproximación a la pista 36: "Apch36.m". En Google Earth se obtiene la Imagen 1.55.

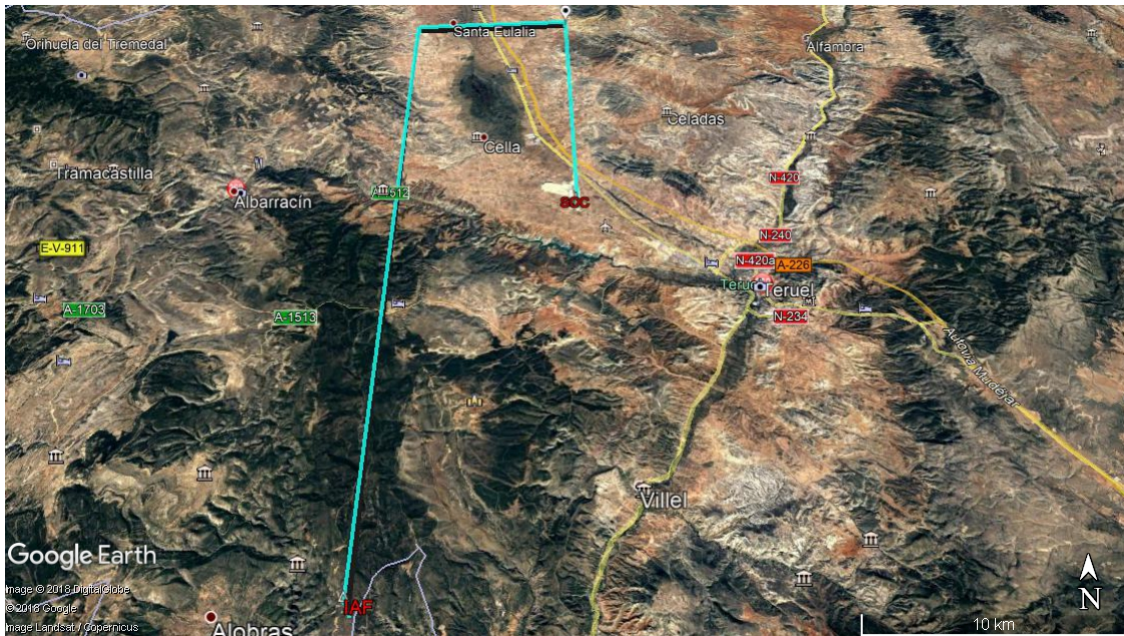


Figura 1.55: Aproximación frustrada para la pista 36

El perfil de elevación de la ruta de aproximación frustrada se presenta en la Imagen 1.56.

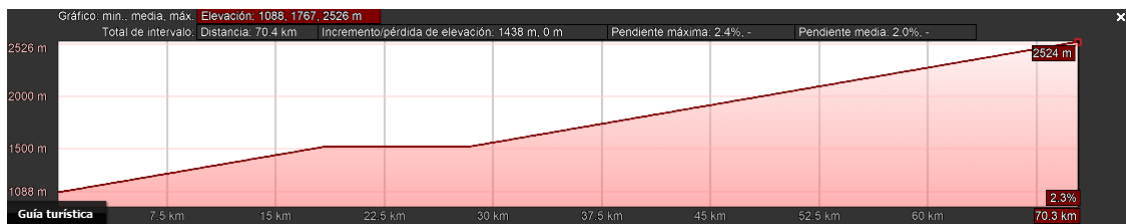


Figura 1.56: Perfil de elevación de la aproximación frustrada para la pista 36

1.9.5. Resumen de la ruta

Se presenta en este apartado un resumen de la ruta, incluyendo los detalles más relevantes de la misma.

En la Tabla 1.12 se muestran los datos más importantes de los puntos que integran la ruta.

Punto de la ruta	Coordenadas	Altitud [m]	Símbolo
IAF	N 040° 11' 00.43" " W 001° 19' 36.40"	2526	◆
IF	N 040° 11' 18.46" " W 001° 12' 29.16"	2026	◇
FAP	N 040° 18' 23.47" " W 001° 12' 46.96"	1576	◆
THR RWY 36	N 040° 18' 23.47" " W 001° 12' 46.96"	1026	-
SOC	N 040° 23' 37.04" " W 001° 13' 00.09"	1120.82	-
P1 frustrada	N 040° 33' 55.37" " W 001° 13' 25.99"	1576	◆
P2 frustrada	N 040° 33' 37.40" " W 001° 20' 27.24"	1576	◇

Tabla 1.12: Resumen de la ruta de aproximación a la pista 36

Por otro lado, se muestra en la Imagen 1.57 la ruta completa, incluyendo la aproximación frustrada y las superficies OAS.

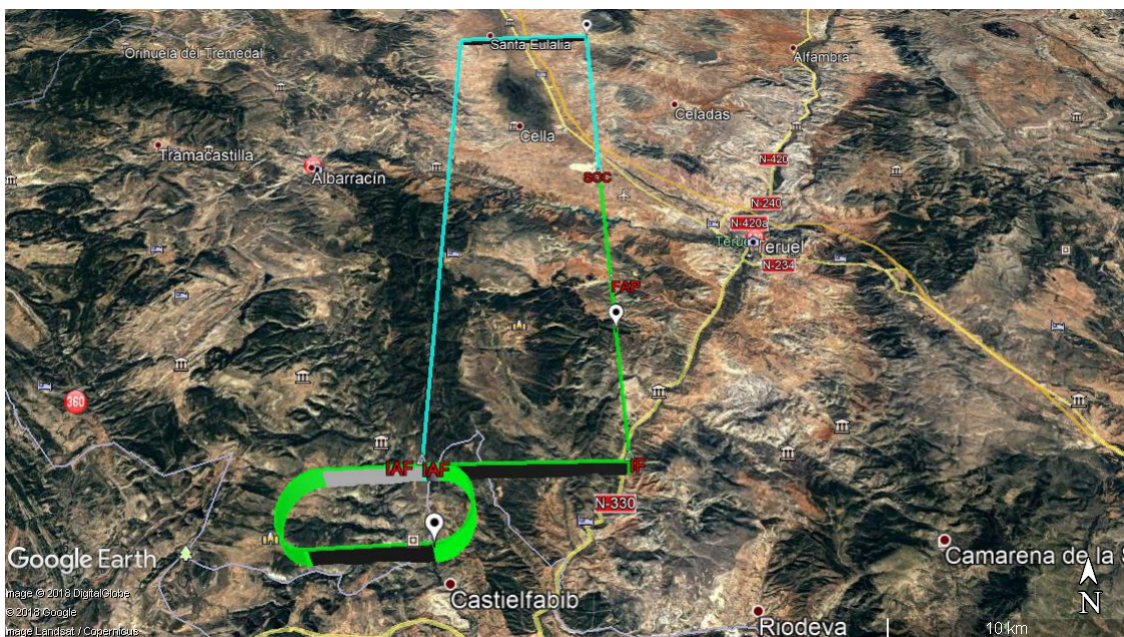


Figura 1.57: Aproximación completa para la pista 36

1.9.6. Superficies de protección horizontal de la ruta

Para finalizar con el diseño de la aproximación a la pista 36, se debe realizar el diseño de la protección lateral de la misma. En este caso, se ha establecido en 1 NM (1852 m), ya que se trata de un RNP 1, a cada lado de la ruta. Este valor se mantiene durante toda la aproximación, hasta llegar a las OAS, momento en el que se mantiene la seguridad requerida.

En cuanto a la aproximación frustrada, se diseña con una protección lateral de 2 NM (3704 m) a cada lado de la ruta, por razones de seguridad operacional. El aumento de la protección lateral presenta un objetivo: asegurar la seguridad de la operación en caso de frustrar el aterrizaje bajo condiciones degradadas de las prestaciones del sistema.

En las Imágenes 1.58, 1.59, 1.60 y 1.61, se puede observar la protección lateral de la ruta.

En ellas se aprecia, como ya se ha mencionado, el aumento del margen de seguridad en la aproximación frustrada al compararse con el de la aproximación en sí, así como en las superficies de franqueamiento de obstáculos. Pese al relieve montañoso del terreno, se constata empleando Google Earth y la opción de representar el perfil vertical que no se vulnera la seguridad vertical de la ruta (MOC).

Por otro lado, en caso de realizarse de acuerdo a la normativa del Doc 8168 de OACI para la aproximación con LPV-200 de SBAS, equivalente a un ILS CAT I, los resultados obtenidos serían los mostrados en las Imágenes 1.62, 1.63, 1.64 y 1.65. Estas áreas de protección resultan menos restrictivas al suponerse una mayor precisión.

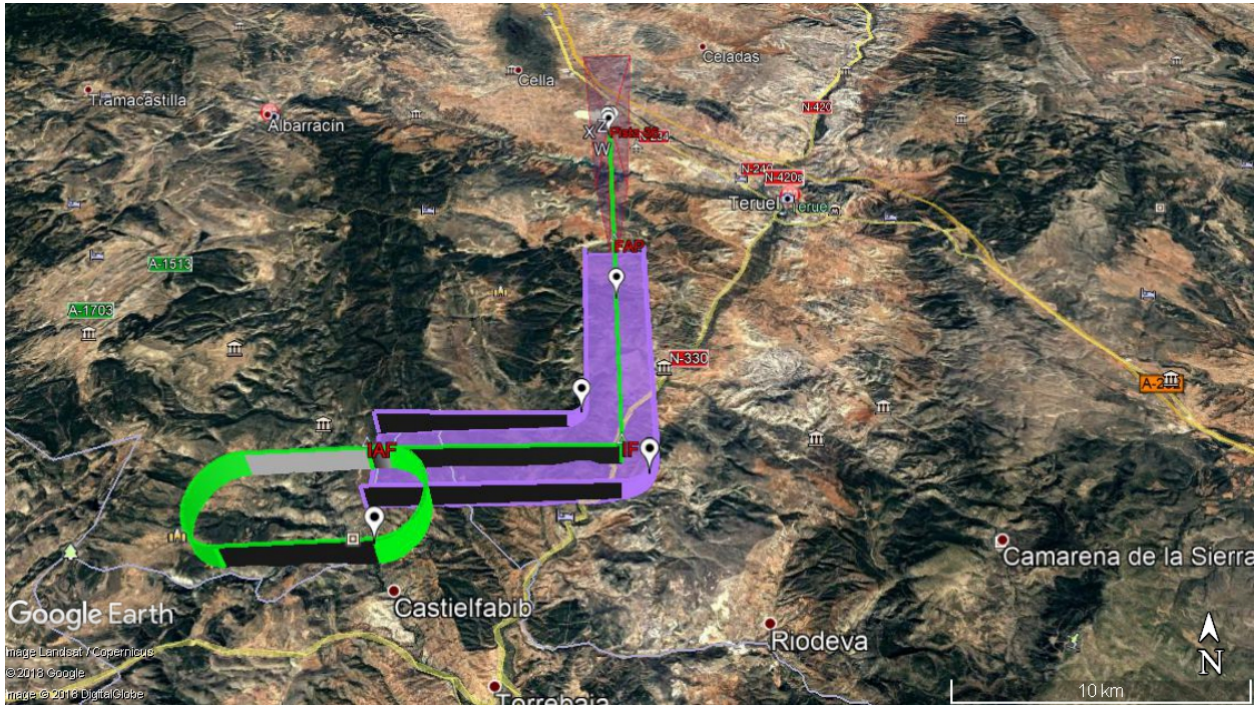


Figura 1.58: Protección lateral para la aproximación a la pista 36

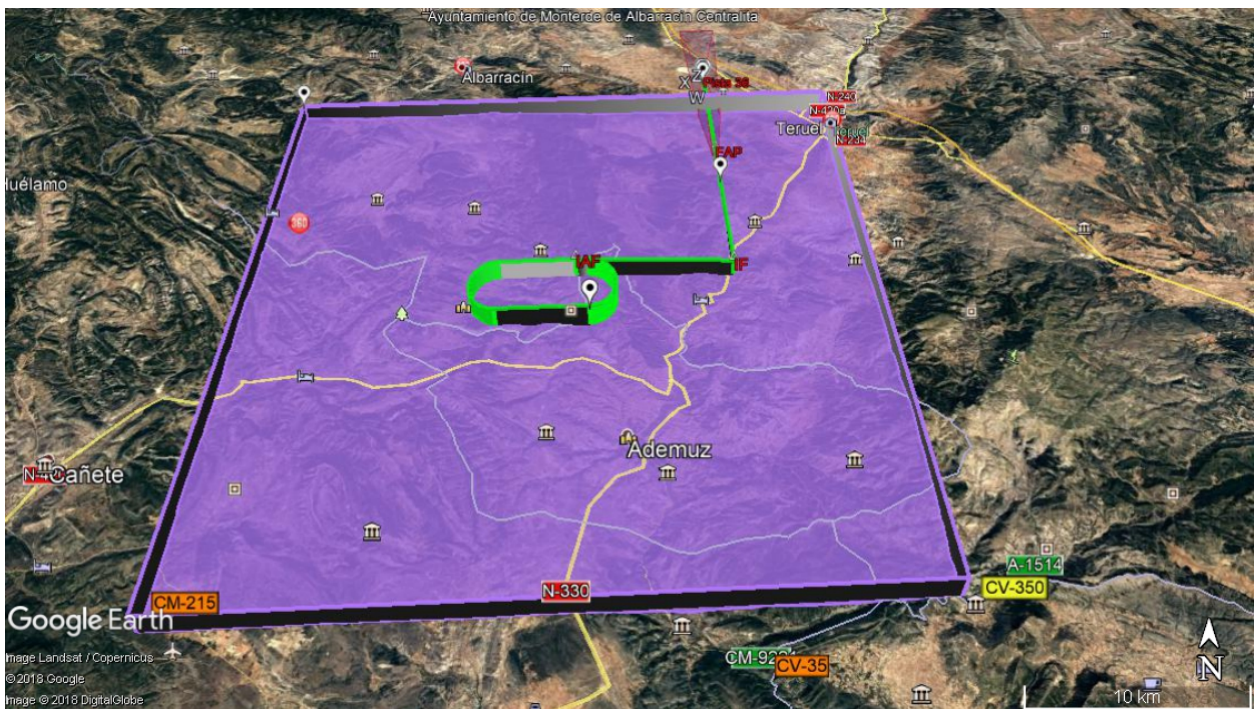


Figura 1.59: Protección lateral para el hipódromo de espera de la pista 36



Figura 1.60: Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 36

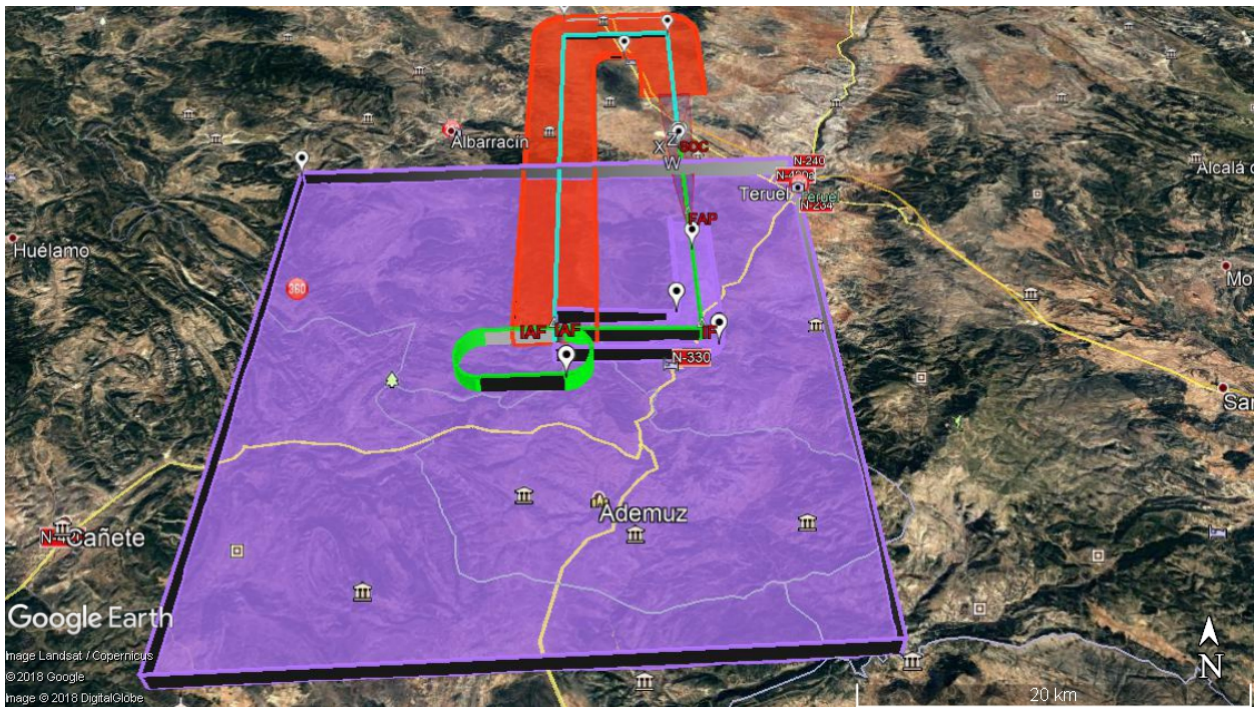


Figura 1.61: Protección lateral para la aproximación completa de la pista 36

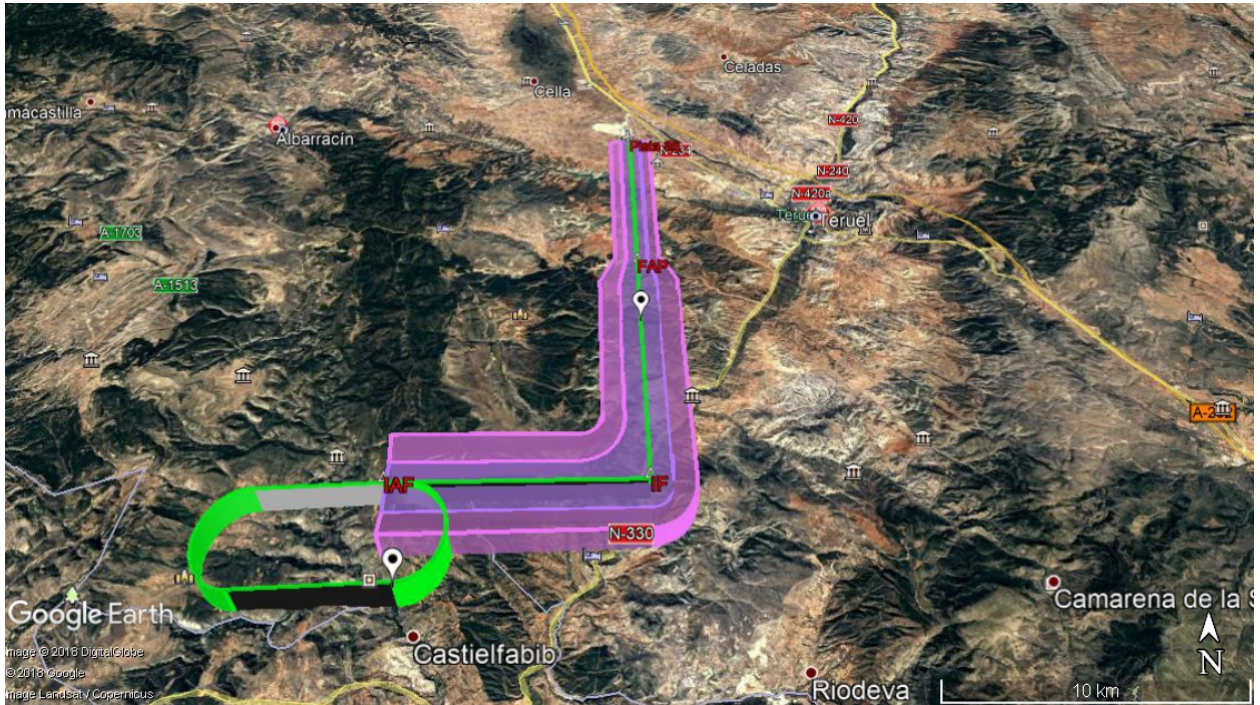


Figura 1.62: Protección lateral para la aproximación a la pista 36

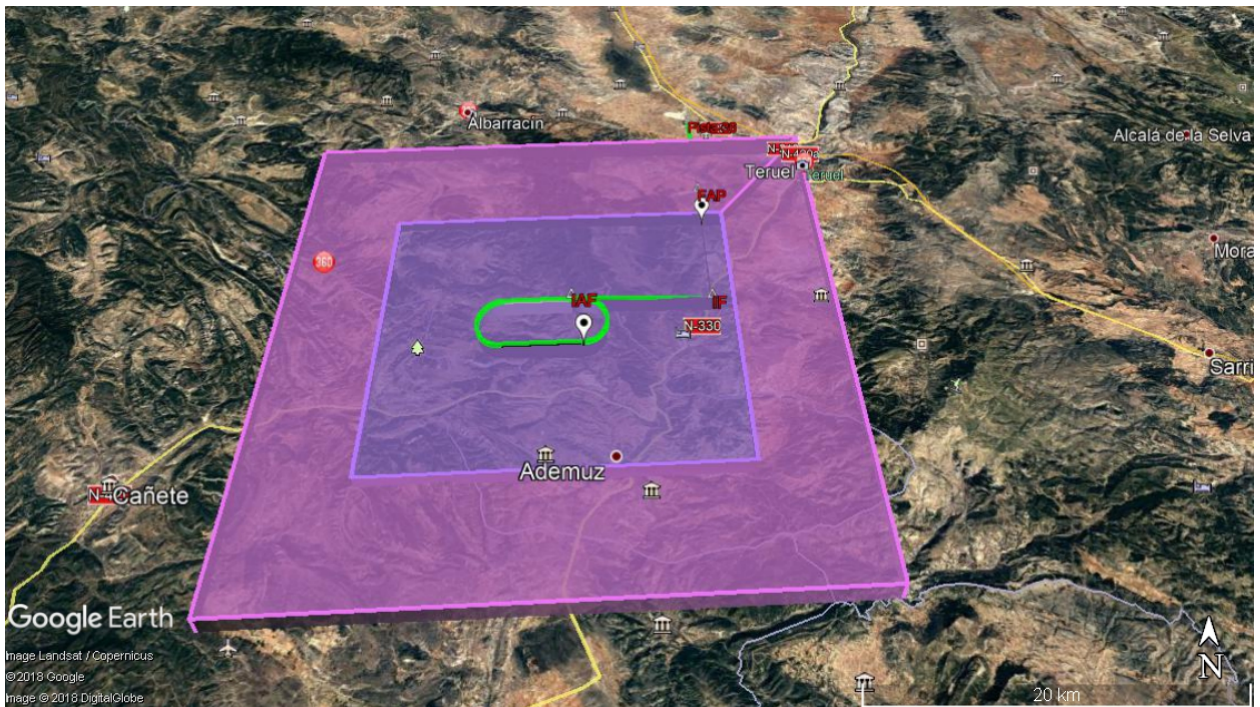


Figura 1.63: Protección lateral para el hipódromo de espera de la pista 36

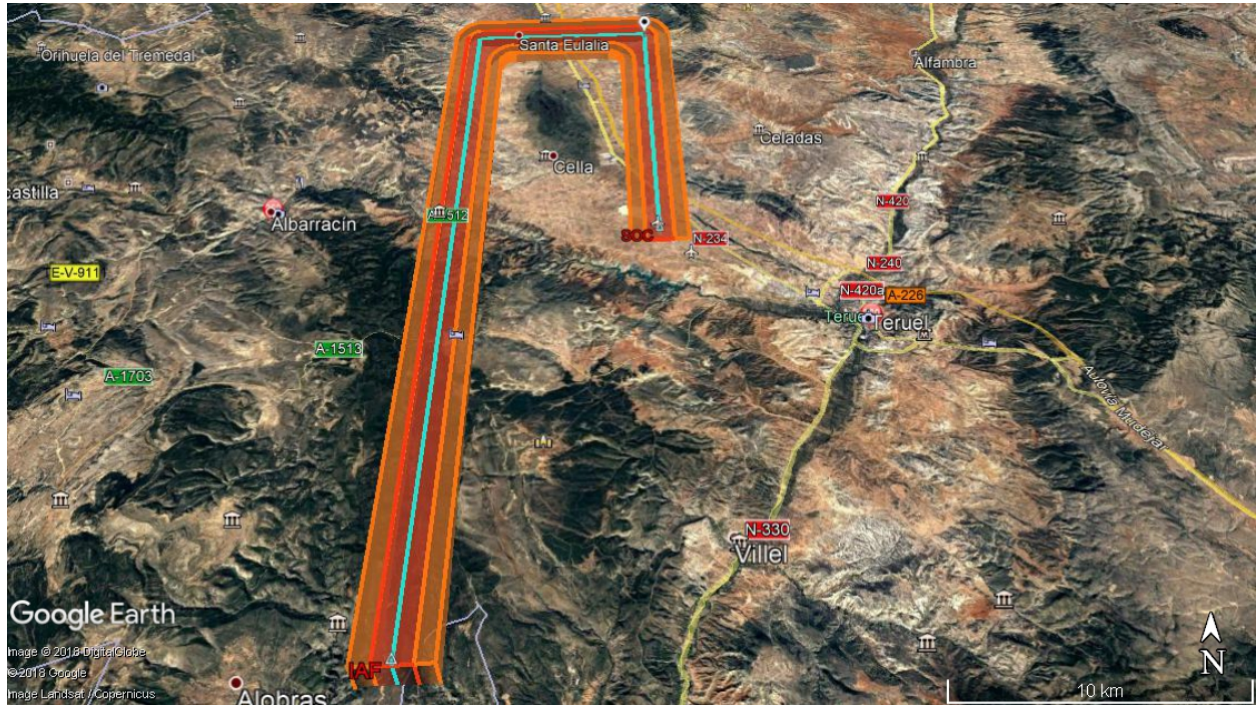


Figura 1.64: Protección lateral para la aproximación frustrada de la pista 36

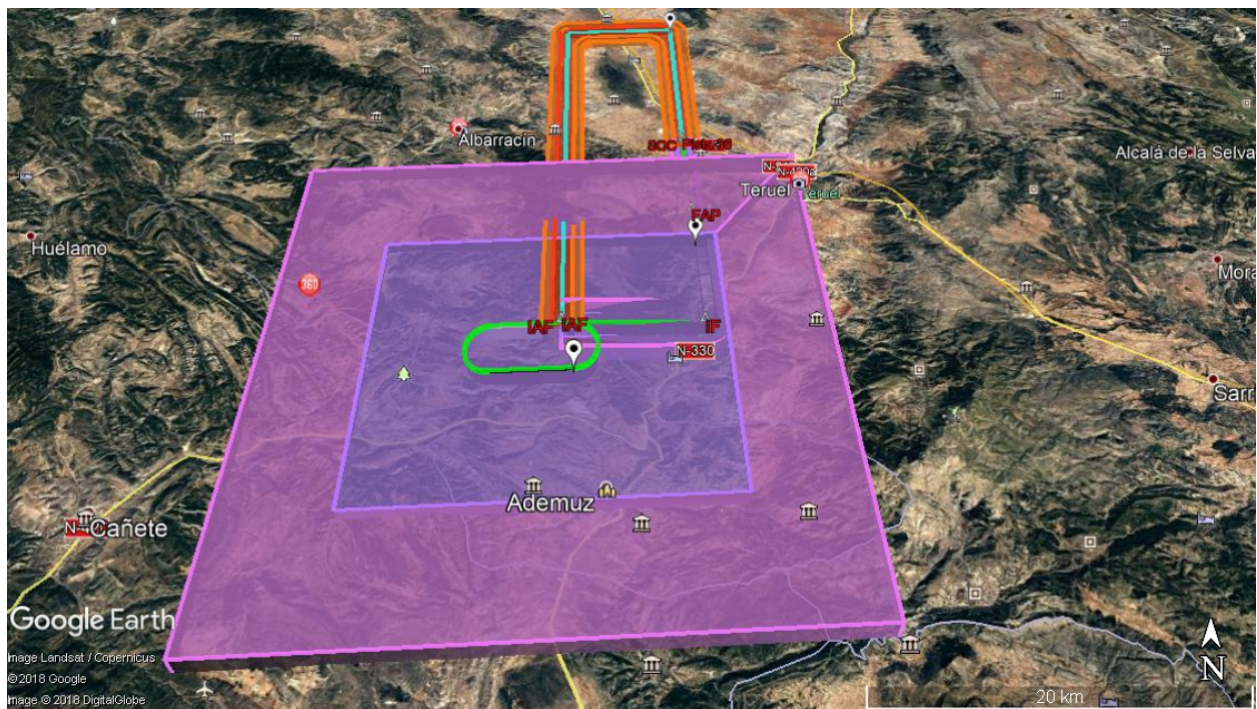


Figura 1.65: Protección lateral para la aproximación completa de la pista 36

1.10. Conclusiones

Como ya se ha podido observar, a lo largo de la primera parte del proyecto se ha realizado el diseño de la ruta de aproximación para las dos cabeceras de pista del aeropuerto de Teruel. Para ello, se ha seguido la normativa encontrada en el Documento 8168 de la OACI, centrando la atención en los procedimientos PBN. Dentro de esta categoría, se ha trabajado con los requerimientos de RNP APCH, más concretamente LPV-200.

La optimización del diseño de las aproximaciones es altamente importante para asegurar la operación y reducir costes. Por fortuna, ambas cabeceras han resultado muy similares en diseño. Esto se debe a la orografía del terreno, algo montañosa pero de altitud relativamente constante (llana).

Por otro lado, el franqueamiento de obstáculos es de relevancia para mantener la seguridad en la operación. Los márgenes se han elegido con la finalidad de poder realizar la aproximación en caso de degradación de la señal y empeoramiento de las prestaciones de los servicios de guiado.

Se ha realizado el diseño, además, de las esperas para mejorar la circulación en el aeropuerto. El método empleado es una simplificación, cuya aproximación es suficiente dado que es más restrictiva en lo que a seguridad se refiere.

Para concluir, cabe destacar que el diseño y puesta en marcha del proceso de aproximación supone una modernización del aeropuerto de Teruel. Esto se debe a que, actualmente, dicho aeropuerto no dispone de una aproximación instrumental, sino únicamente visual. Gracias a la introducción de LPV-200, se puede reducir altamente la carga de trabajo del piloto, permitir aterrizajes en condiciones de meteorología que reduzcan la visibilidad y mejorar la seguridad de los aterrizajes en dicho aeropuerto.

Capítulo 2

Parte II: Ensayos de vuelo mediante un procedimiento SBAS con requerimientos LPV-200

2.1. Introducción

En la segunda parte del proyecto, se expone el procedimiento de validación de la aproximación al aeropuerto de Teruel ya diseñada. Como ya se ha mencionado, se trata de una aproximación empleando GNSS apoyado con SBAS. Los requerimientos son los asociados al servicio LPV-200 ofrecido por EGNOS.

El desarrollo del capítulo se lleva a cabo en distintos apartados que tratan desde los conceptos generales y la descripción de los distintos sistemas GNSS presentes actualmente, hasta los resultados obtenidos para el caso de estudio.

Como ya se ha mencionado, se comenzará con una introducción a los distintos sistemas de navegación por satélite o GNSS, comentando las diferencias que presentan según quién los ha desarrollado. De entre ellos, se mencionarán aquellos que se encuentren en funcionamiento y los que aún estén en desarrollo. Conociendo dichos sistemas, es posible describir los sistemas de aumentación por satélite o SBAS presentes actualmente y que dan apoyo a los principales.

Una vez realizada la descripción introductoria, se procede a hablar de los requerimientos y explicación del sistema LPV-200, así como de las ventajas que presenta. En esta segunda parte se tratará más a fondo este apartado, que ya ha sido introducido en el primer capítulo del proyecto. Adicionalmente, se ha realizado una descripción del proceso de validación de procedimientos SBAS, exclusivo de este tipo de ayuda a la navegación.

Resulta también de interés conocer las generalidades del software que se va a emplear, por lo que se ha realizado una descripción breve del mismo, ayudando así a la comprensión de todo lo empleado. Se incluyen, tras esta parte, los resultados de la validación. Para su mejor comprensión, se realiza una descripción detallada de los ficheros necesarios.

Finalmente, se cierra el capítulo con las conclusiones extraídas de la realización de esta segunda parte del proyecto.

2.2. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

Se conoce como navegación el conjunto de técnicas empleadas en el desplazamiento entre dos puntos conocidos (origen y destino), siguiendo una trayectoria. Gracias a los sistemas de navegación se puede determinar la posición, velocidad, actitud y tiempo del móvil. La estimación, sin embargo, nunca es perfecta, por lo que resulta de gran interés la estimación del error cometido, aumentando la precisión del cálculo cuanto mejor se conozca el mismo.

Se pueden emplear distintas técnicas de navegación, entre las que se incluyen la visual, a estima, autónoma, la basada en radioayudas y, finalmente, la navegación por satélite, más moderna y en la que entran en juego los GNSS.

Para medir la calidad del sistema de navegación se miden cuatro parámetros: precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. Los valores que limiten el error de estos cuatro parámetros dan lugar a los requerimientos que se emplean en la clasificación de los distintos sistemas.

Se procede a explicar en mayor detalle los mencionados sistemas.

2.2.1. Descripción

Un sistema GNSS, o Sistema Global de Navegación por Satélite, es aquel que permite calcular la posición de un usuario con un receptor haciendo uso de una red de satélites de radiofrecuencia.

El campo de aplicaciones de los sistemas GNSS ha ido aumentando con el tiempo de manera considerable, sobre todo desde que en el año 2000 EEUU eliminara la disponibilidad selectiva de su sistema de satélites (GPS), posibilitando que todos los usuarios pudieran obtener una posición bastante precisa. Este hecho ha permitido la proliferación en sectores como el de agricultura, cartografía, coordinación horaria o aviación.

Los GNSS, utilizan sistemas de referencia inerciales para el posicionamiento, siendo el más extendido el WGS84 (*World Geodetic System 1984*). No obstante, en España el sistema oficial es el ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*), promovido por la subcomisión EUREF de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y perfectamente compatible con el WGS84.

Tal y como se verá en la Sección 2.3.3, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite no pueden emplearse como método único para la navegación aérea, dado el incumplimiento

de los requerimientos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. Entre los motivos por los que este hecho tiene lugar, se encuentra la naturaleza militar de los mismos, no garantizando la operación continua para usuarios civiles. Además, los sistemas pioneros GPS y GLONASS no fueron diseñados para satisfacer los requisitos de la navegación por instrumentos o IFR.

Los segmentos de los que se componen estos sistemas de navegación son tres: espacial, terrestre y usuario:

- **Segmento espacial:** Está constituido por los satélites que forman la constelación y las señales emitidas en varias frecuencias. Como cabe esperar, está diseñado para ofrecer cobertura global a los usuarios. Con este fin, la geometría de la distribución de los satélites en el espacio ocupa varios planos orbitales con varios satélites en cada plano, siendo necesarios un total de, normalmente, 21 a 30 satélites.
- **Segmento terrestre:** O segmento de control, encargado de comprobar que todos los satélites funcionen correctamente monitorizando y actualizando o corrigiendo su información y parámetros. Se constituye de estaciones que calculan continuamente su posición y la envían a centros de control, donde los datos son corregidos y enviados a los satélites para actualizar su información.
- **Segmento usuario:** Está constituido por cualquier receptor capaz de captar señal GNSS. Están formados por una antena receptora GNSS y un receptor con un reloj estable que calcula los pseudorangs y resuelve las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas.

Tal y como se muestra en la Imagen 2.1, los satélites que constituyen el segmento espacial envían la señal tanto al segmento de control como al usuario. Las estaciones de seguimiento del segmento de control reciben la señal de los satélites para luego transmitir los datos de las distancias y la meteorología a la estación maestra de control que calcula las efemérides y las correcciones pertinentes. Esta información se envía, posteriormente, a los satélites en forma de mensaje de navegación a través de las antenas de tierra. A continuación, los satélites la envían al usuario, que puede estar situado en tierra, mar o aire, para el cálculo de su posición.

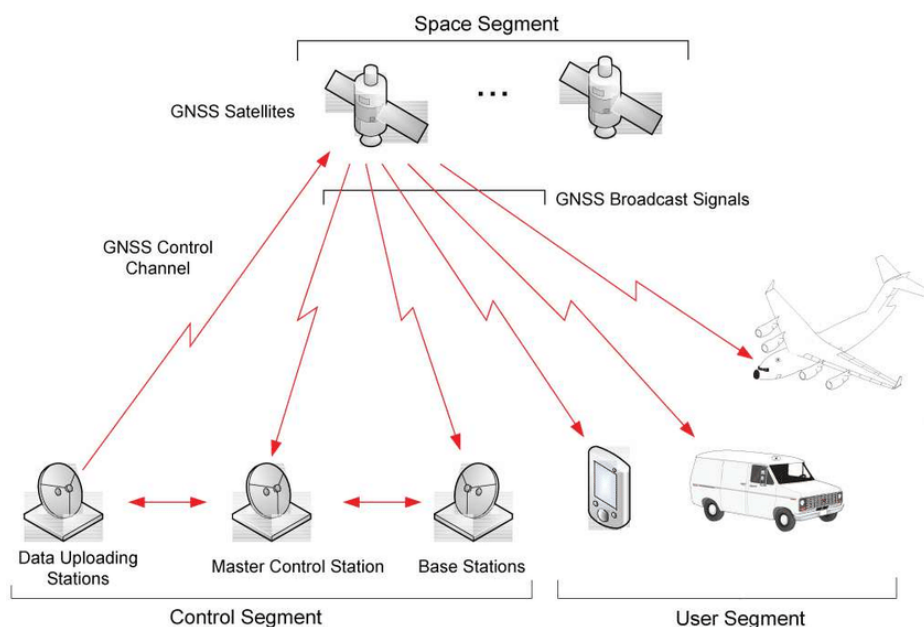


Figura 2.1: Arquitectura GNSS

Se procede, a continuación, a explicar los diferentes sistemas de navegación por satélite existentes. Existen varios de ellos, aunque no todos se encuentran operativos.

2.2.2. GPS o Global Positioning System

El sistema GPS (*Global Positioning System*) fue el primero de los sistemas GNSS y sigue siendo el más importante de ellos. Su desarrollo comenzó a principios de los años 70 a manos del ejército norteamericano, siendo declarado como plenamente operativo en el año 1995. Sin embargo, y como ya se ha comentado anteriormente, no fue hasta el año 2000 cuando se eliminó la disponibilidad selectiva (del inglés S/A: *Selective Availability*), lo que permitió la increíble expansión en el campo de aplicaciones de estos sistemas al mejorar la precisión considerablemente.

La constelación consta de 31 satélites, de los cuales al menos 24 se encuentran operativos el 95 % del tiempo, según el compromiso adoptado por el gobierno estadounidense en 2011. Sin embargo, gracias a un plan de desarrollo *Expandable 24*, actualmente operan de forma efectiva 27 de ellos siempre. Este hecho ha contribuido a la mejora de la cobertura en la gran parte del planeta. El resto de satélites forman parte de la constelación GPS pero no se consideran parte del núcleo de la misma. Los satélites orbitan en una órbita terrestre de tipo MEO (*Medium Earth Orbit*), por lo que están a 20.200 km y cada satélite rodea la Tierra dos veces al día aproximadamente.

La señal se distribuye en dos bandas de frecuencia: La L1 a 1575.42 MHz y la L2 a 1227.6 MHz. El código C/A se transmitía solamente por la banda L1 y tenía una precisión considerablemente inferior a la del código P, transmitida tanto en L1 como L2 para aplicaciones militares.

No obstante, actualmente el sistema GPS está en pleno proceso de transformación con el objetivo de mejorar sus prestaciones tanto civiles como militares, para lo que se está pasando a utilizar una tercera frecuencia, la L5 a 1176.45 MHz y nuevas señales civiles (L1C, L2C y L5) y militares (L1M y L2M). Para ello, se encuentran reemplazando los satélites antiguos por otros nuevos, programa que comenzó en julio de 2016 y que se ha ralentizado debido a problemas de presupuesto.

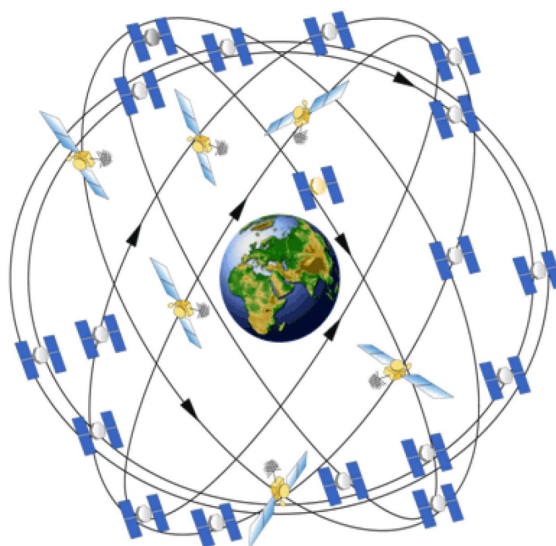


Figura 2.2: Constelación GPS

2.2.3. GLONASS o Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

El sistema de navegación GLONASS fue la respuesta soviética al desarrollo del GPS americano. Se empezó a desarrollar en el año 1982 y llegando a ser completamente operacional en el año 1993. No obstante, debido a los problemas económicos de la neófito Federación Rusa, se redujo considerablemente el presupuesto en el programa espacial y el sistema cayó en mal estado pudiendo mantener apenas unos 8 satélites operativos.

Sin embargo, al comienzo del siglo XXI, se retomó el interés por GLONASS y se desarrolló un plan de modernización para lanzar una nueva generación de satélites, empezando en 2004. En el año 2010 contaba ya con 18 satélites para dar cobertura a todo el territorio

ruso y, a partir de 2011, es capaz de dar cobertura global con 24 satélites.

La órbita de los satélites GLONASS es también del tipo MEO, pero se encuentran por debajo de los de la constelación GPS. La inclinación de su órbita es de 64.8° .

Del mismo modo que GPS, transmiten en dos bandas de frecuencia. La señal abierta de precisión estándar se codifica con la letra *O* de *Open Signal* (L1OF/L2OF) y la protegida de alta precisión, con la letra *S* de *Obfuscated Signal* (L1SF/L2SF).

Los satélites operativos son los de las series GLONASS-M y GLONASS-K1, que incorporan junto con las mencionadas señales, la nueva señal civil L3OC en todos aquellos que hayan sido lanzados a partir de 2014. También se planea el lanzamiento de los satélites de la serie GLONASS-K2 a partir del presente año, los cuales mandarían más señales abiertas y operarían a partir de 2025.

2.2.4. Galileo

Galileo es el nombre del programa europeo de sistema GNSS. Es un proyecto financiado por la Unión Europea y desarrollado en conjunto con la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo objetivo es tener en Europa un sistema independiente del americano y del ruso, aunque interoperable con ambos. Una serie de retrasos sucesivos ha impedido que se encuentre en funcionamiento pleno actualmente, aunque se prevé que lo esté en la primavera de 2020.

A diferencia de GPS y GLONASS, Galileo es un servicio únicamente civil que permanece bajo control civil.

Los satélites de Galileo orbitarán entorno a la Tierra en tres planos diferentes y con una inclinación de 56° , cada satélite tardará 14 horas en orbitar la Tierra. Los dos primeros satélites se lanzaron en 2011 y los dos siguientes en 2012. Con ellos se realizó la validación en órbita y, tras recibir la aprobación, se siguieron poniendo en órbita satélites. A finales del pasado año (2017), se lanzaron 4. Actualmente, consta de un total de 22 satélites. En la primavera de 2018 se espera que entre en funcionamiento.

Galileo constará de cuatro frecuencias: E5a, E5b, E6 y E1 y proveerá los siguientes servicios:

- **Open Service (OS):** Es el servicio público y gratuito de Galileo. Tendrá una precisión de alrededor de un metro.

- **Commercial Service (CS):** Será un servicio encriptado que ofrecerá precisión centimétrica, pensado para desarrollo de aplicaciones y empresas que estén dispuestas a pagar para obtener un mejor rendimiento que con el *Open Service*.
- **Public Regulated Service (PRS):** Este servicio está pensado para aplicaciones gubernamentales importantes como infraestructuras estratégicas (energéticas, telecomunicaciones, finanzas) o seguridad nacional, por lo que también estará encriptado y será accesible solamente para usuarios autorizados.
- **Search and Rescue Service (SAR):** Es el servicio de Galileo destinado a buscar y rescatar personas en situaciones de riesgo, detectando señales de emergencia y enviando mensajes de ayuda.
- **Safety of Life Service (SoL)** Se trata del servicio más importante para el sector de la aviación, puesto que, junto con EGNOS, mejora considerablemente el rendimiento del OS y permite utilizarlo en sectores como el citado cumpliendo con los requisitos necesarios.

2.2.5. Beidou

El sistema de navegación por satélite Beidou (BDS: *BeiDou Navigation Satellite System*) es el programa en desarrollo por el gobierno chino que pretende ser completamente operacional para 2020.

Desde finales de 2011, el sistema ya da cobertura a la región Asia-Pacífico con una constelación de 15 satélites (6 GEO: *Geostationary Earth Orbit*, 5 IGSO: *Inclined Geosynchronous Orbit* y 4 MEO: *Medium Earth Orbit*). En 2015, se lanzaron los satélites 17, 18, 19 y 20 de la constelación, que permitían la expansión de la señal de Beidou a nivel global. En 2016, ya se han lanzado dos satélites más de la constelación (22 en total), continuando así con la fase III del proyecto que planea completarse para 2020, cuando se alcance la operatividad total del sistema y éste conste de un total de 5 satélites geoestacionarios y 30 no geoestacionarios (27 MEO y 3 IGSO).

Además, se tiene previsto que el sistema Beidou sea interoperable con el resto de sistemas GNSS para que sean compatibles. Poseerá servicios de *Open Service* gratuito para cualquier usuario y *Authorized Service* de más precisión para usuarios autorizados.

2.2.6. IRNSS o NAVIC

El sistema IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) o NAVIC, actualmente, se diferencia de los sistemas vistos hasta ahora en que se trata de un sistema regional, es decir, no poseerá un área de servicio global, sino que su área será de en torno a 1500 kilómetros alrededor de la India.

El programa está financiado por el gobierno de la India y posee 7 satélites. Tres GEO y cuatro GSO, para conseguir la mejor cobertura regional con el menor número de satélites. Aunque se preveía que estuviese operativo a partir de 2015, no fue así debido a diversos retrasos. En 2013 se puso en órbita el primero de los 7 satélites y, aunque el sistema se consideraba operativo a partir de abril de 2016, se ha tenido que idear un plan de renovación del primer satélite. En abril del presente año se enviaría el que sería el octavo de la constelación.

Provee dos tipos de servicios, uno gratuito (*Special Positioning Service*) y otro más preciso (*Precision Service*) para usuarios autorizados en bandas de frecuencia L5 (1176.45 MHz) y S (2492.08 MHz).

2.2.7. QZSS

El último de los sistemas de navegación por satélite existentes es el QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), desarrollado por el gobierno japonés desde 2002. Se trata, al igual que el sistema IRNSS, de un sistema regional que da cobertura a la región del este de Asia y Oceanía.

Se compone de 3 satélites en órbitas HEO (*Highly Elliptical Orbit*), lo que permite que siempre se encuentre uno de los tres en el zenit encima de Japón, aumentando la cobertura en esta región. Posteriormente, se propuso lanzar cuatro satélites GEO para conseguir en el futuro una constelación de 7 satélites en vez de los 3 iniciales y alcanzar la completa independencia del sistema americano. En 2011 se lanzó el primero de los 4 restantes. A finales del año 2017, se lanzó el último de ellos, por lo que, actualmente, hay 7 satélites en órbita. En 2018 el sistema operará conjuntamente a GPS, esperando declararse independiente del mismo en 2023.

2.3. Sistemas de Aumentación

Como ya se ha visto, los sistemas globales de navegación por satélite, permiten obtener la posición en cualquier lugar con receptores sencillos. Sin embargo, para ciertas aplicaciones, es necesaria una mayor precisión en las medidas, además de otros requerimientos que se verán más adelante.

Los sistemas de aumentación se utilizan para obtener mejores prestaciones (integridad, precisión, disponibilidad y continuidad). Éstos emplean dispositivos de los que se conoce con gran precisión su posición y permiten calcular la diferencia entre la medida real y la observada, así como las correcciones de las medidas de pseudorange de los satélites, que posteriormente son enviadas a los usuarios para mejorar su posición. En la actualidad existen tres tipos de sistemas de aumentación:

- GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), o sistema situado en tierra.
- SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*), o sistema de satélites que orbita en torno a la Tierra.
- ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*), o sistema embarcado en la aeronave.

Los tres son sistemas de navegación diferencial, pero la diferencia radica en el hecho de que SBAS da cobertura en área extensa, mientras que ABAS y GBAS son locales.

2.3.1. GBAS

Se trata del sistema que proporciona la aumentación mediante estaciones terrestres que envían las correcciones. Fue desarrollado para la aviación y es capaz de ofrecer precisiones muy elevadas. Generalmente, el sistema GBAS está compuesto por distintas estaciones que toman las medidas GNSS y transmiten las correcciones realizadas al usuario a través de radiotransmisores. La ventaja que presenta este proceso es la transmisión directa al usuario final, eliminando la limitación asociada al uso de satélites GEO.

No obstante, presenta una limitación en su rango de operación, ya que no es capaz de proporcionar información más allá de unos pocos kilómetros, es decir, de forma local. Esto provoca que se desarrollen en el entorno del aeropuerto en el que se vaya a emplear. A menor distancia entre la estación de tierra y el receptor, mayor será la precisión. Su funcionamiento es crucial ya que, en esas fases, la precisión y la integridad de la señal son críticas, especialmente cuanto menor sea la visibilidad.

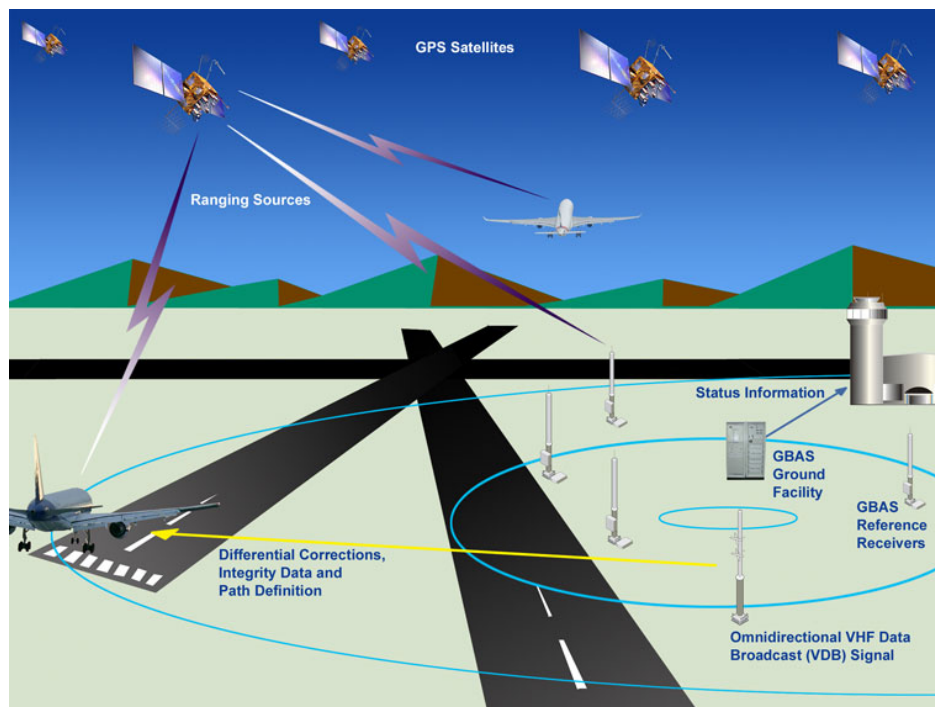


Figura 2.3: Arquitectura GBAS

2.3.2. SBAS

Es el sistema de aumentación basado en satélites, caracterizado por proporcionar apoyo regional, es decir, en un área de amplitud determinada gracias a la difusión de mensajes por satélite. Por ello, SBAS se convierte en el único sistema de aumentación diferencial de área extensa, a diferencia de GBAS o ABAS que eran locales. Gracias a SBAS, las aeronaves son capaces de emplear sistemas de navegación GNSS.

El funcionamiento básico de los sistemas SBAS está basado en la transmisión de las correcciones diferenciales necesarias para mejorar la señal por satélites geostacionarios, a los que llega la información a través de estaciones que calculan continuamente estas correcciones. Un sistema SBAS está formado por los siguientes segmentos:

- **Segmento espacial:** Formado por los satélites geostacionarios que envían la señal aumentada a los receptores de señal GNSS en la misma frecuencia que la señal convencional de GNSS.
- **Segmento tierra:** Constituido por un gran número de estaciones de referencia que reciben y monitorizan la señal GNSS, enviando las observaciones a una estación donde se calculan las correcciones y se forma el mensaje SBAS, posteriormente enviado a estaciones llamadas Uplink Station, que envían esta información a los satélites.

- **Segmento usuario:** Está formado por cualquier receptor SBAS, el cual recibe simplemente los datos ya corregidos para mejorar su posicionamiento.

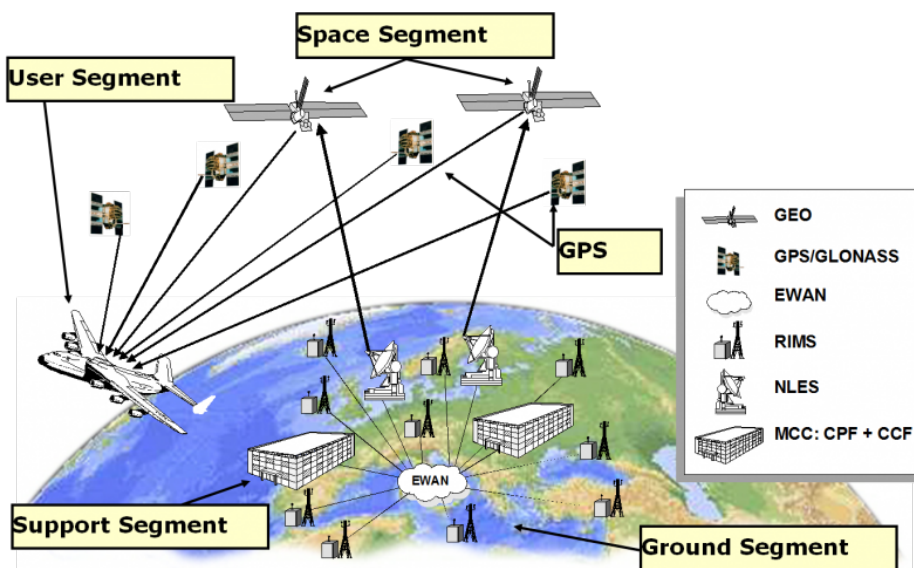


Figura 2.4: Sistemas Arquitectura SBAS

Actualmente, hay distintos sistemas SBAS implementados en el mundo como son WAAS, EGNOS, GAGAN, SDCM, etc. Sus áreas de operación se recogen en la Imagen 2.5 y se verán en mayor detalle en posteriores apartados.

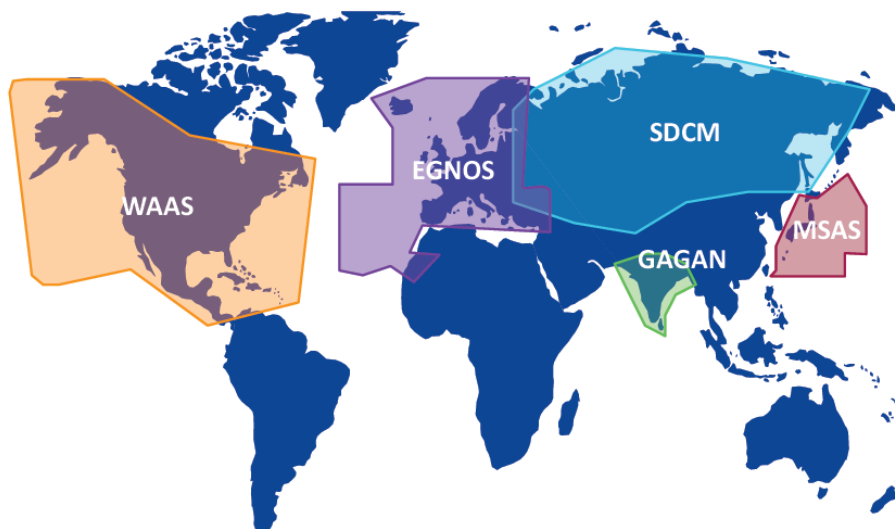


Figura 2.5: Sistemas SBAS según su área de operación

Fundamentos matemáticos

Los fundamentos matemáticos del SBAS parten de la base del GPS diferencial con pseudorangos de código, cuyo valor para una estación A y un satélite j se puede modelar por la ecuación:

$$R_A^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) + \Delta\rho_A^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_A(t_0) \quad (2.1)$$

Donde R es el pseudorango, ρ es la distancia geométrica entre la estación y el satélite, $\Delta\rho$, los efectos de error radial de la órbita y de refracción ionosférica/troposférica y δ , el error de los relojes.

Introduciendo la corrección del pseudorango para el satélite j en un tiempo de referencia t_0 :

$$PRC^j(t_0) = -R_A^j(t_0) + \rho_A^j(t_0) = -\Delta\rho_A^j(t_0) + c\delta^j(t_0) - c\delta_A(t_0) \quad (2.2)$$

A partir de una serie temporal de datos de correcciones de pseudorangos, se puede calcular la corrección de variaciones de distancia RRC. De este modo, la corrección de pseudorangos en una época cualquiera se puede aproximar por:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0) \quad (2.3)$$

Procediendo del mismo modo para una segunda estación B:

$$R_B^j(t_0) = \rho_B^j(t_0) + \Delta\rho_B^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_B(t_0) \quad (2.4)$$

Y aplicando la corrección de pseudorangos se tiene:

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t)) \quad (2.5)$$

Donde se observa que desaparecen los errores de los satélites. Despreciando los errores radiales de las órbitas, se tiene:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + \Delta\delta_{AB}(t) \quad (2.6)$$

Donde se tiene el término:

$$\Delta\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t) \quad (2.7)$$

Que es el error combinado de los relojes de los receptores. Aquí los efectos de despla-

zamiento de reloj de satélite, degradación de órbita y errores ionosféricos y troposféricos se han eliminado prácticamente.

WAAS

WAAS o *Wide Area Augmentation System* es el sistema de aumentación por satélite estadounidense. El programa comenzó su desarrollo en 1992 por la FAA (*Federal Aviation Agency*) y el DTO (*Department of Transportation*) y está especialmente diseñado para la navegación aérea. El sistema fue declarado completamente operacional en 2003. Además, permite aumentar en mayor medida las prestaciones haciendo uso de LAAS (*Local Area Augmentation System*) para áreas muy localizadas.

Su estructura y objetivos de ofrecer precisión, integridad, continuidad y disponibilidad son la referencia para el resto de sistemas SBAS presentes en el mundo. Actualmente, WAAS cumple con los requisitos y da soporte a los siguientes procedimientos de vuelo:

- LNAV/VNAV (*Lateral Navigation/Vaertical Navigation*).
- LP (*Localizer Performance*).
- LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*).
- LPV-200 (*Localizer Performance with Vertical Guidance para CAT I de precisión*).

En todos ellos el guiado vertical preciso es de suma importancia.

Como ya se ha mencionado, WAAS es un sistema SBAS, por lo que su funcionamiento ya ha sido descrito con anterioridad en la introducción del Apartado 2.3.2. No obstante, presenta una característica adicional: la capacidad de indicar a sus receptores los lugares en los que no se puede emplear el sistema debido a errores en el mismo u otros problemas. Las emisiones que puedan dar lugar a error se notifican en un periodo de 6 segundos a los usuarios, gracias al elevado nivel de seguridad bajo el que ha sido diseñado.

El número de usuarios actuales en EEUU asciende a 80000, todos ellos relacionados con la aviación. Su desarrollo ha permitido la implementación de aproximaciones del tipo LPV-200, permitiendo el acceso de aeronaves a más de 3400 pistas con condiciones de visibilidad que imposibilitaban el vuelo sin las prestaciones asociadas a este servicio. Esto es, con alturas de decisión de 200 ft. Asimismo, WAAS da soporte a operaciones del tipo RNP 0.3 e incluso más precisas.

Actualmente, son cuatro los satélites GEO que integran el segmento espacial de WAAS.

Current GEO satellites supporting WAAS			
			
Intelsat Galaxy 15	Telesat Anik F1R	Eutelsat Satmex-9	SES SES-15
Launched: 10/2005 Operating: 133 °W	Launched: 9/2005 Operating: 107.3 °W	Launched: 6/2016 Operating: 117 °W <i>Operational: 3/2018</i>	Launched: 5/2017 Operating: 129 °W <i>Operational: 6/2019</i>

Figura 2.6: Satélites GEO del sistema WAAS

MSAS

El MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) es el sistema SBAS japonés. Éste hace uso de los satélites de navegación japoneses. Por otro lado, dispone de las estaciones en tierra para generar las correcciones y el mensaje SBAS, que envían a 2 satélites geostacionarios. Éstos, a su vez, hacen llegar el mensaje al usuario. Está operativo desde 2007 y permite la interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS.

GAGAN

GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*) es el sistema de SBAS de la India que comenzó a ser diseñado en 2001 a manos del ISRO (*Indian Space Research Organization*). Comenzó a ser operativo a principios de 2015 y permite la interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS. Actualmente, posee tres satélites geostacionarios para enviar los mensajes SBAS.

EGNOS

El último de los sistemas SBAS, que se verá con mayor profundidad, es el de EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), desarrollado a tres bandas por la Unión Europea, la ESA (*European Space Agency*) y la empresa EUROCONTROL.

La arquitectura de EGNOS sigue el estándar de todos los sistemas SBAS con algunas peculiaridades. Consta de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento tierra y el segmento usuario. Actualmente, funciona aumentando las prestaciones del sistema GPS, pero en un futuro se espera que realice su función con GALILEO, aún en fase de desarrollo.

La variante SBAS de los sistemas de aumentación nace de la necesidad planteada por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) a principio de los noventa. La finalidad es cubrir las deficiencias presentes en los sistemas de posicionamiento global empleados en la navegación aérea.

Aunque el programa EGNOS se aprobó en el año 1994, no fue hasta 2009 cuando se realizaron las primeras operaciones del sistema completo, declarándose apto para su uso en aviación en el año 2011. El sistema es provisto por ESSP (*European Satellite Services Provider*).

Actualmente existe un plan de evolución de EGNOS para dar cobertura de servicios multi-constelación y multi-frecuencia en el marco EGNOS V3, que se encuentra, a su vez, en el Horizonte 2020 de la Comisión Europea.

Los segmentos que componen el sistema EGNOS son:

- **Segmento terrestre:** Se trata del más complejo de los segmentos tierra de los SBAS ya explicados anteriormente. Cuenta con cuatro tipos de estaciones terrestres de seguimiento, cada una de las cuales desarrolla una función. Éstas son RIMS, MCC, NLES y PACF/ASQF.

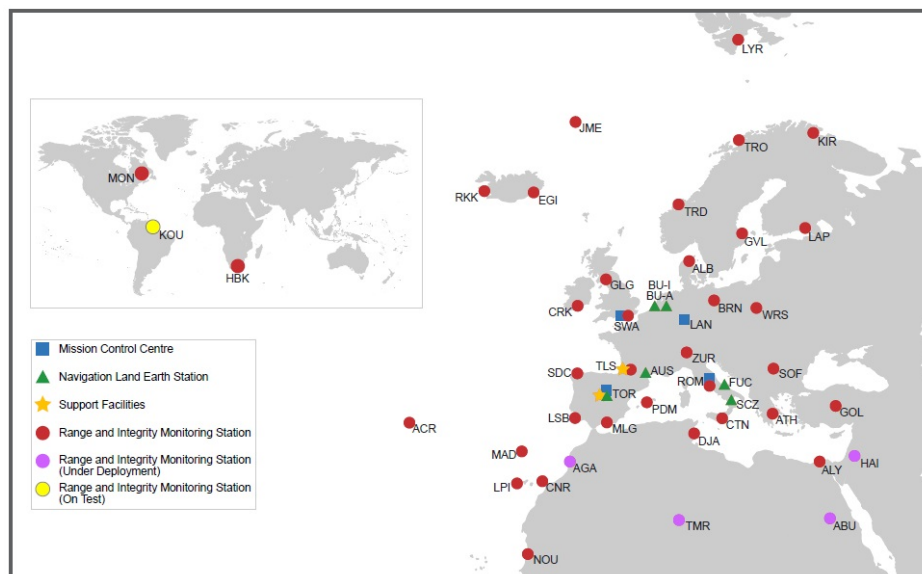


Figura 2.7: Segmento terrestre de EGNOS

- RIMS (*Ranging Monitoring Stations*): Situadas por todo el continente europeo, además de Canadá y Sudáfrica, son las encargadas de monitorizar las señales recibidas de las constelaciones GNSS (GPS, GLONASS y en un futuro Galileo).

Dicha monitorización se realiza en antenas de las que se conoce su posición con gran exactitud y que envían esta información a los MCC. Hay dos tipos de RIMS: las RIMS A, que recogen los datos y generan la corrección y las RIMS B, que recogen datos y comprueban esta corrección.

- MCC (*Mission Control Centres*): Existen 4 centros de control situados en Madrid, Londres y cercanías de Roma y Frankfurt. Todos ellos tienen como misión realizar los cálculos necesarios a partir de los datos obtenidos por las RIMS. Dentro de los MCC existen dos tipos de módulos: el CPF (*Central Processing Facility*) destinado a elaborar las correcciones y estimación de errores en el mensaje, y el CCF (*Central Control Facility*) que supervisa el sistema y se encarga de guardar los datos generados.
 - NLES (*Navigation Land Earth Stations*): Son las estaciones encargadas de enviar los mensajes de navegación a los satélites geoestacionarios. Existen 2 de ellas por cada satélite geoestacionario operativo de EGNOS, estando situadas dos en Goonhilly (Reino Unido) y una en Aussaguel (Francia), Fucino y Scanzano (Italia) y Torrejón (España).
 - PACF/ASQF (*Performance Assessment and Check-out Facility/Application Specific Qualification Facility*): Son infraestructuras de apoyo diseñadas para operaciones de mantenimiento y verificación. Hay 2, una situada en Madrid y la otra en Toulouse.
- **Segmento espacial:** El segmento espacial de EGNOS se compone de los satélites geoestacionarios que forman la constelación, con el objetivo de transmitir en el área europea las correcciones calculadas a los usuarios. Actualmente hay 2 satélites EGNOS completamente operativos y 1 en fase de pruebas. Cada uno de ellos es identificado, al igual que los satélites de una constelación GNSS convencional, por su PRN (*Pseudo Random Noise*), único para cada satélite.
- PRN 120: Inmarsat-3 AOR-E (*Atlantic Ocean Region East*). Es uno de los satélites completamente operativos.
 - PRN 123: Inmarsat-4 F2 EMEA (*Europe Middle East Africa*). Es el otro de los satélites completamente operativo.
 - PRN 136: Astra SES (Sirius-5). En fase de pruebas.

Anteriormente a la actualización realizada en marzo de 2017, momento en el que se emitió una nota de servicio que especificaba la actualización del segmento espacial de EGNOS, el satélite PRN 123 que estaba en fase de pruebas, pasó a estar completamente operacional. Por su parte, el satélite PRN 136 inició su fase de pruebas. Esto

tuvo lugar entre el 20 y 21 de marzo de 2017. Durante un período de 18 horas hubo operativos 3 satélites geoestacionarios.

Por otro lado, el servicio EGNOS ofrece tres correcciones diferentes:

- Rápidas: Se trata de los errores asociados a la sincronización de los relojes, los mensajes con la precisión de las corrección y los mensajes para decodificar correcciones. Dependiendo del tipo de corrección, se envía información sobre a qué satélite corresponden, o bien, mensajes específicos de correcciones rápidas.
- A largo plazo: Engloban todo lo relacionado con la corrección de posición del satélite, mensajes de posición con las correcciones y mensajes para decodificar dichas correcciones. En este último caso, es posible incluir un caso especial en el que se indica si el número de satélites en la última máscara es inferior a 6 y, de ser así, envía correcciones rápidas y de largo plazo.
- Ionosféricas: Se trata del sistema que modeliza la ionosfera en tiempo real y que es capaz de transferir al usuario el modelo de correcciones de forma instantánea.

Los servicios ofrecidos por EGNOS son los explicados a continuación:

- *EGNOS Open Service (OS)*: Este servicio puede ser utilizado por cualquier usuario en Europa equipado con un receptor compatible GPS/SBAS, sin necesidad de certificación. Su función es la de la mejora de la exactitud de la posición mediante correcciones de los errores clave de la señal GNSS. Su precisión oscila entre 1 y 2 metros el 99%. Se debe tener en cuenta que, sin el uso de EGNOS, la precisión GPS es de unos 17 metros.
 - *EGNOS Safety of Lige (SoL)*: Siendo el servicio que se provee a la navegación aérea. Su precisión es mayor, pudiéndose realizar operaciones bajo los requerimientos NPA (*Non-Precision Approach*) y APV-I (*Approach with Vertical Guidance*), así comoo LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*). Otra de sus características es la capacidad de mantener los requerimientos de integridad, disponibilidad y continuidad.
 - *EGNOS Data Access Service (EDAS)*: Es el servicio que da ESSP para acceder a los datos transmitidos por los satélites de EGNOS en tiempo real, junto con otras mediciones GPS y GLONASS en todas las estaciones de la red EGNOS. Se puede acceder a dichos datos a través del servidor EDAS o mediante *EDAS Client Software*.
- **Segmento usuario**: El segmento usuario es la última parte de la arquitectura de EGNOS y está constituido por cualquier usuario equipado con un receptor capaz de

captar la señal de EGNOS. A través del servicio EGNOS *Data Access Service* (EDAS) también se puede acceder a los datos proporcionados por EGNOS.

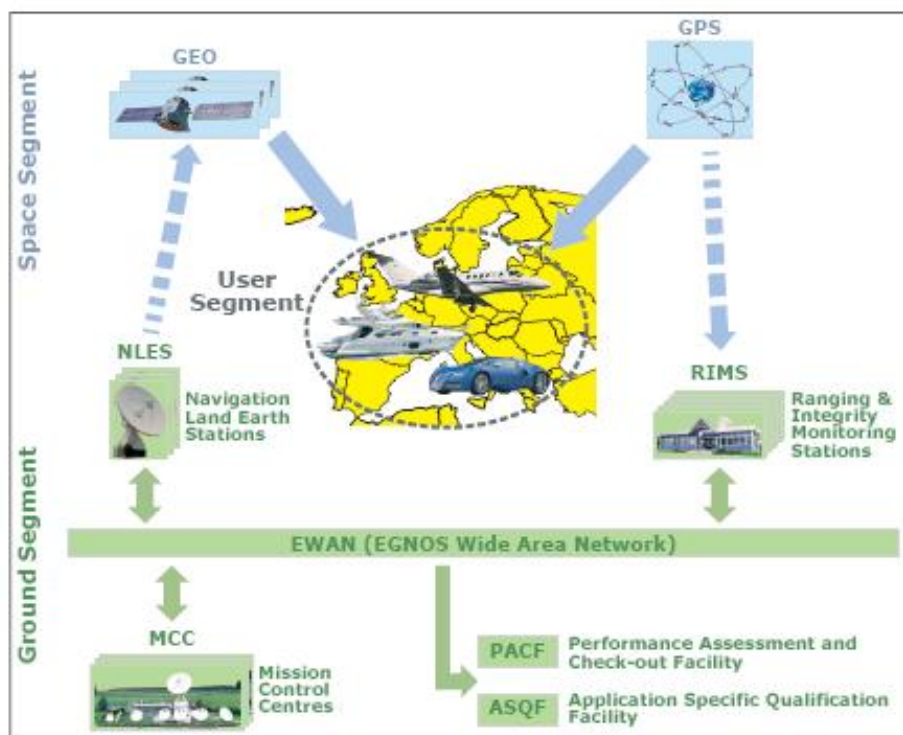


Figura 2.8: Arquitectura EGNOS

Finalmente, el mensaje EGNOS se compone de 250 bits divididos en:

- 8 bits de preámbulo. Existen 3 tipos distintos de preámbulo.
- 6 bits que indican el tipo de mensaje.
- 212 bits que contienen la información de los mensajes.
- 24 bits finales o bits de paridad utilizados para la detección de errores.

Los distintos tipos de mensajes se recogen en la Figura 2.9.

TIPO DE MENSAJE	DESCRIPCION
MT1	Proporciona datos de la máscara PRN
MT2-MT5	Proporciona correcciones rápidas
MT24	Proporciona correcciones rápidas y a largo plazo
MT25	Proporciona correcciones a largo plazo
MT24	Proporciona correcciones rápidas y a largo plazo
MT26	Proporciona correcciones ionosféricas
MT18	Principio de la máscara asociado a correcciones ionosféricas (IGP)
MT6	Información sobre integridad
MT7	Factores de degradación para correcciones rápidas
MT10	Factores de degradación para correcciones ionosféricas y a largo plazo
MT12	Parámetros de sincronización entre ENT y UTC
MT17	Emite almanaques de los tres satélites
MT9	Transmite posición, velocidad y aceleración de los satélites
MT27	Aumenta el valor de σ_{UDRE}
MT28	Ampliación del mensaje MT27
MT62	Mensaje sin contenido
MT63	Mensaje tipo nulo

Figura 2.9: Tipo y descripción de mensaje EGNOS

2.3.3. ABAS

Este es el sistema de aumentación caracterizado por tener a bordo de la aeronave todo el equipamiento necesario para la aumentación. La mejora que consigue de los requerimientos de navegación por satélite viene de la aumentación de los receptores GNSS con detección de fallos y de la mejora de la precisión.

En este sistema, los sensores a bordo del avión reciben información adicional que se usa en el cálculo de la posición. Por un lado, para monitorizar la integridad, asegurando el cumplimiento de los requisitos, emplea RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) que es un sistema de monitorización que permite la mejora de la integridad mediante el uso de señales GNSS redundantes, por lo que se consigue una mejor solución de la posición y la detección de señales defectuosas. Por otro, la detección y eliminación de señales defectuosas se realiza con el equipo FDE (*Fault Detection and Exclusion*) para que no se usen en los cálculos.

El sistema ABAS se emplea en las fases de ruta (crucero), salidas y llegadas.

2.4. LPV-200

En el presente apartado se pretenden resumir los aspectos generales de LPV-200 para, a continuación, profundizar en el estado de implementación del servicio a nivel mundial, así como en cada uno de los requerimientos necesarios para llevar a cabo una aproximación (precisión, integridad, continuidad y disponibilidad).

2.4.1. Descripción

La agencia del GNSS europeo (GSA) ha puesto en marcha una nueva tecnología que ofrece a los pilotos instrumentos mejorados para aterrizajes de aviones más seguros, incluso en condiciones meteorológicas adversas de categoría I. El anuncio se realizó en el taller anual de EGNOS (*Service provision workshop*).

LPV-200 es un nivel de servicio EGNOS que permite las aproximaciones 3D instrumentales de tipo A o B basadas en SBAS de acuerdo a lo estipulado en el Anexo 10 de OACI para aproximaciones de precisión de Categoría I con requerimientos de SIS (*Signal In Space*) y VAL (*Vertical Alert Limit*) de 35 m (equivalente a ILS CAT I). La altura de decisión de dicho sistema es de 200 ft (61 m) y las aproximaciones realizadas empleando el mismo son, como ya se ha mencionado, de tipo instrumental y de precisión (IAP o *Instrument Approach Procedure*). Proporciona información precisa sobre el enfoque de una aeronave a una pista con el uso de tecnología de posicionamiento GNSS, así como guiado vertical y lateral sin la necesidad de contacto visual con el suelo de la aeronave hasta alcanzar una altura de 200 pies (61 metros).

La altura de 200 pies se corresponde con la altura de decisión. Estos sistemas de aproximación basados en sistemas EGNOS se consideran como aproximaciones con ILS, pero sin necesidad del enorme gasto que supone instalar el sistema de tierra. EGNOS LPV-200 proporciona todas las ventajas de una aproximación ILS CAT I, además de la flexibilidad de una aproximación basada en PBN.

- Reducción de los riesgos asociados con el aterrizaje en condiciones de mal tiempo.
- Mejor accesibilidad a los aeropuertos.
- Reducción de retrasos, desvíos y cancelaciones.
- Mantenimiento de los niveles de seguridad.
- Mayor robustez frente a perturbaciones ionosféricas, lo que supone un aumento de la cobertura.

- Mejora de la eficiencia de las operaciones, reduciendo el consumo de combustible, emisiones de CO_2 y disminución del impacto medioambiental de la aviación.

Los requisitos de LPV-200 son más estrictos que los de APV-I. Como ya se sabe, LPV-200 pertenece a la APV. La diferencia entre APV-I y LPV-200 radica en que, el primero de ellos presenta mínimos menos restrictivos, es decir, menos precisión, aunque también hace uso de sistemas SBAS.

2.4.2. Beneficios de su implementación

Como ya se ha mencionado en el Apartado 2.4.1, el sistema LPV-200 se emplea en aproximaciones instrumentales de precisión de tipo A o B, equivalentes a un ILS de CAT I.

Se enuncian a continuación los beneficios que presenta dicho sistema en su funcionamiento:

- Provee de guiado lateral y vertical sin contacto visual del suelo hasta una altura de decisión de 200 ft.
- Habilita RNP APCH con los mínimos de LPV hasta los 200 ft y proporciona ayuda en los procedimientos de aproximación 3D de tipo A y B de CAT I.
- Habilita las aproximaciones de precisión donde aún hoy no es posible realizarlas.
- Presenta mínimos en DH (Decision Height) menores que para APV-Baro.
- Presenta menor impacto operacional manteniendo los niveles de seguridad.

Todo esto se traduce en un mayor número de beneficios tanto directos como indirectos.

En cuanto a los requisitos de disponibilidad de LPV-200, se establece que para un nivel de protección (xPL) menor que el nivel de alerta (xAL), de acuerdo a la probabilidad de que el VNSE exceda los mínimos:

- 10 m en operación con condiciones de sistema nominal, establecidas a 10^{-7} / por aproximación.
- 15 m para operación con condiciones de sistema degradado a 10^{-5} / por aproximación.

Los requisitos de continuidad son los mismos que los establecidos para disponibilidad.

Por otro lado, es importante hablar de los problemas que resuelve el sistema LPV-200:

- Seguridad en los horarios en vuelos chárter o programados debido a la ausencia de ayudas tradicionales de aproximación en tierra en destinos remotos.
- Coste de nueva infraestructura (ILS presenta en este aspecto mayor coste de infraestructura y mantenimiento).
- Gasto de combustible en aproximaciones de no precisión (ahorro).
- Debilidades de ILS:
 - Área "limpia".
 - Alineación con la pista.
 - Fallos de equipamiento ILS en tierra.
 - Problemas ocasionales con la senda de planeo provocando perturbaciones.
- Reducción del mantenimiento del aeropuerto al eliminar instalaciones ILS.
- Sustitución de ILS CAT I.

En cuanto a los beneficios operacionales:

- Se parece a ILS.
- Permite la implementación de requisitos RNAV.
- Se encuentra en un proceso de expansión global.
- Supone un ahorro inmediato con su implantación.
- La instalación en todas las aeronaves es razonable y alcanzable.
- Existencia del CMA-5024, un servicio certificado y probado de aerolíneas con LPV.
- Se reduce la dependencia de radioayudas terrestres.
 - Mejora en SIDs que emplearán SBAS.
 - Mejora en STARS con SBAS y LPV.
 - Si el ILS está fuera de servicio se puede seguir usando LPV.
- Seguridad mejorada debido al guiado vertical.
- Ausencia de errores en la captura de la senda de planeo.
- Sin limitaciones debido al frío.

Y los beneficios que presenta la infraestructura incluyen la independencia de la variación en el terreno, que no afecta a la precisión de la aproximación. Por otro lado, no requiere mantenimiento al tratarse de un sistema basado en satélite. Además, presenta interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS, con lo que tan solo necesita un receptor para dichos sistemas.

Países como EE UU que ya han implantado dicho sistema, como se verá a continuación, han publicado las ventajas ya observadas y obtenidas de dicha implantación. La FAA publicó en 2004 que el uso de LPV-200 supuso una reducción en los mínimos de las operaciones, así como la integridad suficiente durante el procedimiento. El aumento de los instrumentos de aproximación disponibles fue significativo.

2.4.3. Implementación

Las ventajas que presenta el servicio LPV-200 proporcionado por EGNOS han permitido la implementación de aproximaciones de precisión del tipo RNP APCH en aeródromos donde, hasta la existencia de dicho servicio, no era posible realizarlas.

Actualmente, el sistema SBAS de EGNOS se encuentra, todavía, en proceso de desarrollo, ya que para su utilización se deben superar una serie de fases de validación en aquellos aeródromos en los que se desee implementar.

En EE UU, el nivel de implantación de LPV-200 es total. Entre 2009 y 2013, WAAS se dedicó a la implantación de dicho servicio en el país. Tanto LPV-200 funcionando con WAAS, como LPV-200 funcionando con EGNOS, son interoperables, lo que facilita la navegación gracias al uso de un solo receptor SBAS a bordo de la aeronave.

Como ya se ha mencionado, su implantación comenzó en el año 2009 y, a fecha de hoy, existen 3886 procedimientos de aproximación LPV que emplean WAAS, usándose en un total de 1894 aeropuertos. Además, de esos aeropuertos 1132 no utilizan ILS, por lo que la realización de una aproximación del tipo CAT I se puede llevar a cabo gracias a la existencia del mismo. La cobertura es total y excelente en todo el país, incluyendo la zona de Alaska.

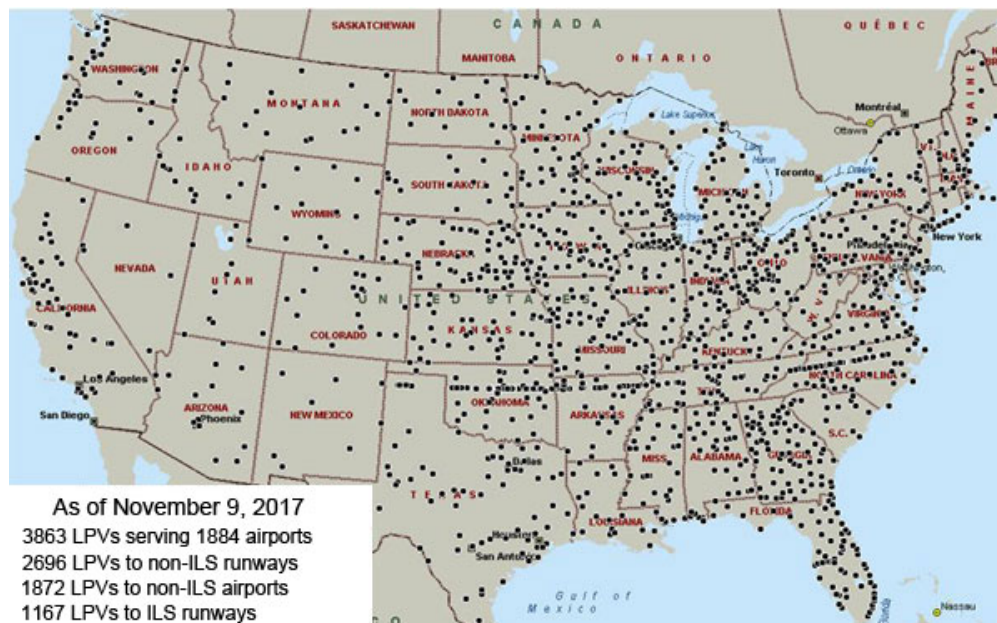


Figura 2.10: Aeropuertos con aproximaciones WAAS LPV

A diferencia de Estados Unidos, en Europa el proyecto se encuentra aún en fase de desarrollo, aunque el número de aeropuertos que cuentan con el sistema LPV-200 es cada vez mayor.

El primer procedimiento en el continente Europeo, se llevó a cabo en el aeropuerto de París Charles de Gaulle, en el que aterrizó por primera vez un ATR 42-600 en mayo de 2016 empleando el sistema LPV-200. El éxito obtenido llevó a la implantación en Viena y así sucesivamente, a la vez que el plan de implantación se sigue desarrollando en los diferentes aeropuertos año tras año.

El estado actual de implementación del servicio LPV-200 de EGNOS se muestra en la Imagen 2.11. Por su parte, la previsión de los aeropuertos y helipuertos que incluirán el servicio aparece en la Imagen 2.12.

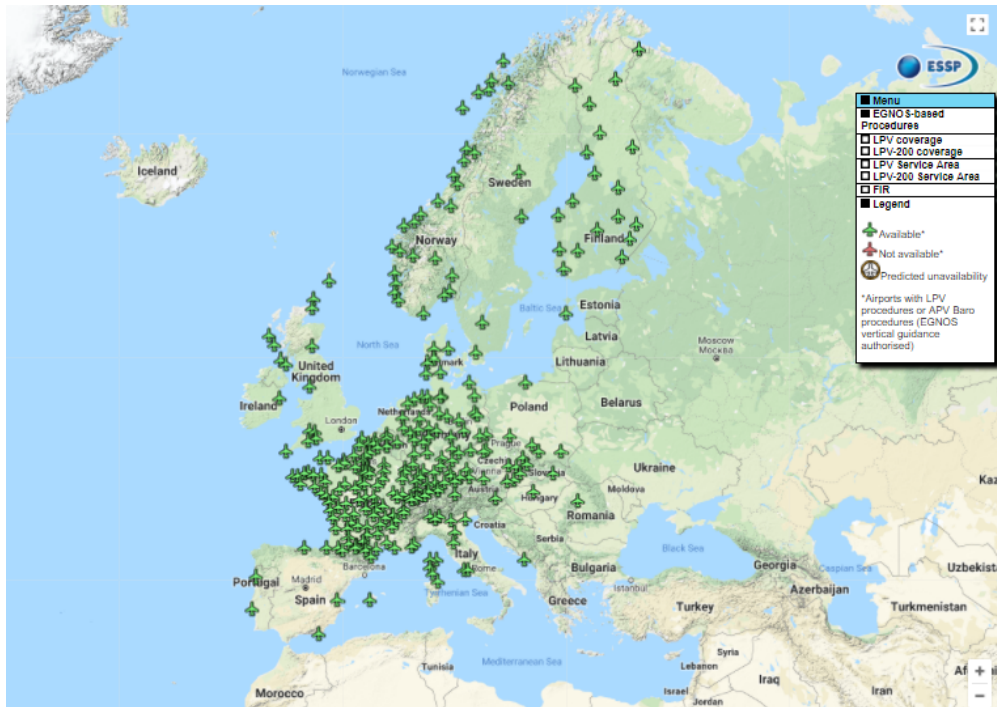


Figura 2.11: Aeropuertos con aproximaciones EGNOS LPV

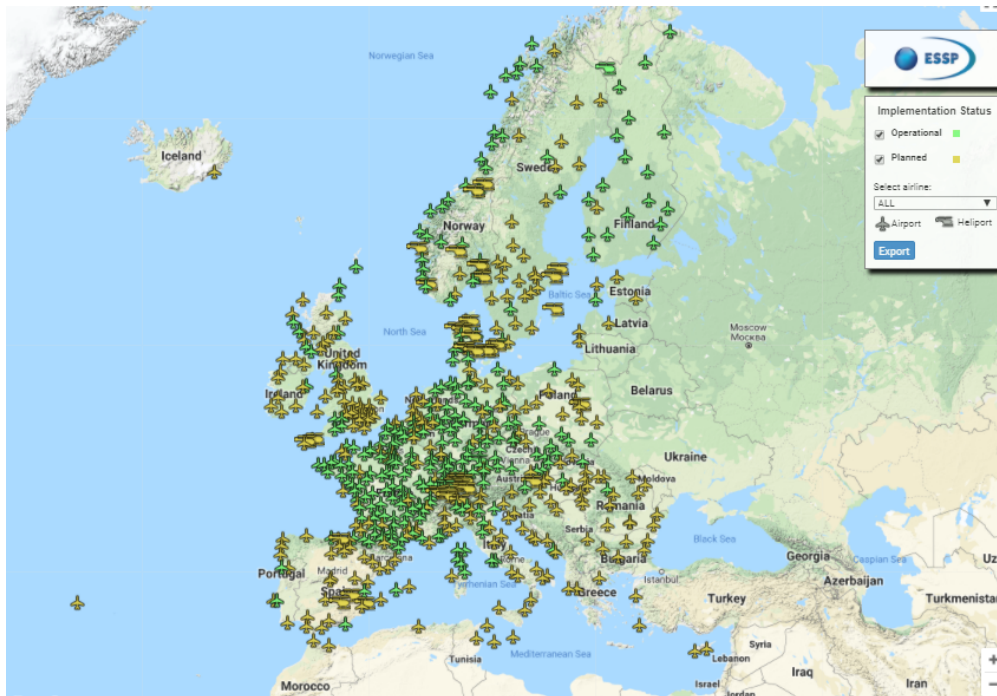


Figura 2.12: Aeródromos con futuras aproximaciones EGNOS LPV

De la observación de las imágenes se puede deducir que los países más avanzados en Europa en materia de implantación de este tipo de aproximación son Francia, Alemania, Finlandia y Noruega. En España, por el contrario, el número de aeródromos con procedi-

mientos LPV-200 es relativamente pequeño, aunque se planea incrementarlo en un futuro cercano.

Resulta de interés destacar que la aerolínea británica *easyJet* pretende llevar a cabo operaciones LPV-200 en el horizonte 2020, al valorar los beneficios que aportan estas operaciones.

Se puede concluir que, pese a que en Estados Unidos la implantación de aproximaciones haciendo uso de SBAS está prácticamente concluida, en Europa aún se encuentra en desarrollo, habiendo un gran número de aeropuertos y helipuertos pendientes de validación.

2.4.4. Implementación en España

En cuanto a la implementación en España, el proceso tiene un desarrollo lento en comparación a otros países europeos como Francia. Actualmente, existen cuatro aeropuertos españoles con procedimientos LPV-200: Almería, Santander, Palma y Valencia, tal y como se puede observar en la Imagen 2.13. La aerolínea que operará con este tipo de aproximaciones es la española Air Nostrum.

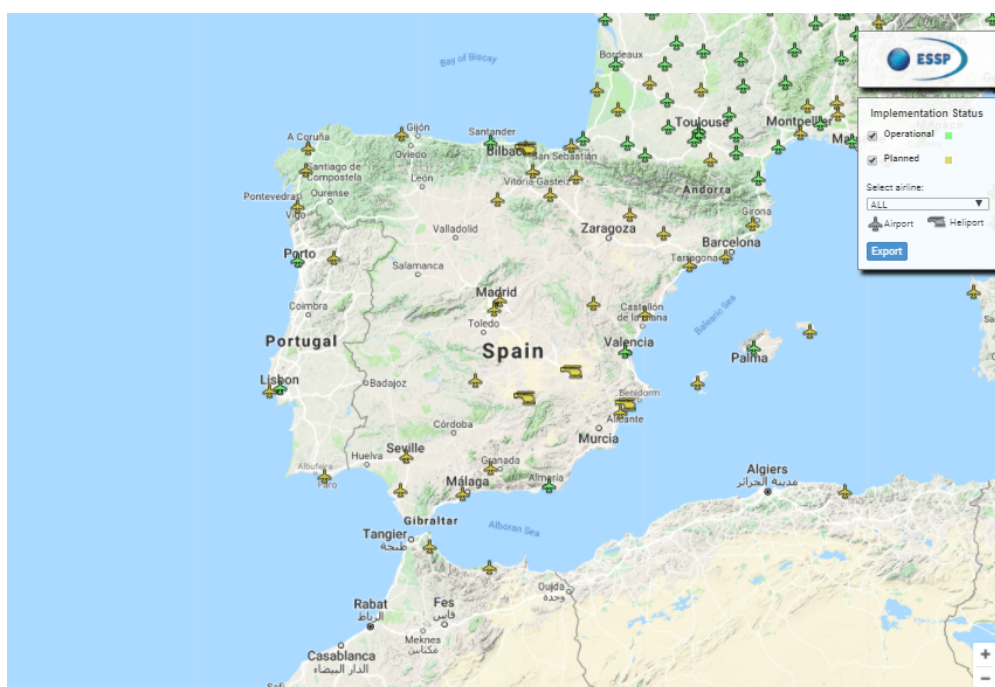


Figura 2.13: Aeródromos con aproximaciones EGNOS LPV presentes y futuras en España

Se espera conseguir la implementación del servicio en la mayoría de helipuertos y aeropuertos españoles, encontrándose las fechas previstas entre 2016 y 2020. Sin embargo, hay algunos de ellos cuya fecha no está definida. Según los datos publicados por EGNOS, el proceso debería completarse en 2020, pero este horizonte se difumina por la presencia de los

ya mencionados aeropuertos sin fecha establecida.

Las aerolíneas que operarán en los aeropuertos con aproximaciones LPV son las españolas Air Nostrum, que ya se encuentra operativa en el aeropuerto de Santander e Inaer (servicio de emergencias y mantenimiento de aeronaves); la francesa HOP!; la letona Air Baltic; Qatar Airways; Ethiopian Airways; la flota europea Airbus Transport International y Etihad Airways, segunda aerolínea de los Emiratos Árabes Unidos. En cuanto a las compañías que operarán en helipuertos, se encuentran las españolas Helicsa e Inaer y el helicóptero médico Osakidetza.

En resumen, el proceso de implantación de LPV-200 en los aeropuertos españoles sigue un desarrollo lento con sucesivos retrasos en la consecución del plan establecido debido a la dificultad en la certificación y validación de los procedimientos. No obstante, se prevé establecer el sistema en el horizonte de 2020, facilitando así las operaciones y reduciendo el coste de infraestructura y mantenimiento. De esta manera, España forma parte del plan europeo de implantación de EGNOS.

2.4.5. Requerimientos

Las prestaciones y calidad de un sistema GNSS vienen dadas por los valores obtenidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, comparándolos con los valores RNP (*Required Navigation Performance*) establecidos por la OACI y demás organismos reguladores, como EASA, para las diferentes fases de vuelo.

En el presente proyecto es de sumo interés analizar el ya mencionado servicio LPV-200 ofrecido por EGNOS. Cabe destacar que este facilita y aporta beneficios a la navegación RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), más conocidos como drones. Estos sistemas presentan elevados requisitos en cuanto a precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

Precisión

La primera característica a evaluar para la certificación de un sistema es la precisión. Se suele definir como la diferencia entre la posición estimada y la posición real, y se expresa de forma estadística como un determinado percentil en la distribución de errores. En el caso de la navegación aérea, se suele utilizar el percentil 95, lo que implica que el 95% de las medidas tendrán un error menor o igual al valor de precisión. No obstante, también se suele dar el percentil 99 y el 50, además de la media y la desviación, tanto para el error horizontal (HNSE: *Horizontal Navigation System Error*) como para el vertical (VNSE: *Vertical Navigation System Error*).

La OACI establece unos requerimientos de precisión para las aproximaciones LPV-200 de 16 m en horizontal y de entre 4 y 6 m en vertical, requerimientos que EGNOS cumple de sobra al tener en torno a 1 metro de error en el posicionamiento horizontal y de 2.1-2.5 metros en el vertical.

Integridad

La integridad se define como medida de la confianza depositada en la validez de la información proporcionada por el sistema o, lo que es lo mismo, la probabilidad de que el servicio de navegación tenga la precisión especificada y de que, en caso de que la información proporcionada al usuario no sea utilizable, éste disponga de avisos. Es importante definir algunos términos antes de entrar en detalle.

- *Alert Limit* (AL): Límite de alerta. Es la tolerancia al error que no debe ser superada sin emitir un mensaje de alerta al usuario.
- *Time to Alert* (TAL): Tiempo de alerta. Es el máximo tiempo que puede pasar desde que el sistema de navegación se encuentre fuera de los valores de tolerancia hasta que el equipamiento envía la alarma.
- *Integrity Risk* (IR): Riesgo de integridad. Se define como la probabilidad de que en un momento determinado el error de posición sea superior al límite de alerta.
- *Protection Level* (PL): Nivel de protección. Se trata de un error estadístico que asegura que la probabilidad de que el error de posición absoluto sea mayor que ese número sea menor o igual que el riesgo de integridad.

Existen dos tipos de herramientas para medir la integridad y representarla gráficamente: los índices de seguridad y los diagramas Stanford.

El índice de seguridad es la relación entre el error del sistema de navegación y el nivel de protección. Este cociente debe ser siempre menor que 1 para que la operación sea segura. En EGNOS el índice de seguridad es prácticamente siempre menor a 0.5, tal y como se muestra en la Imagen 2.14.

EGNOS SoL: LPV200 Integrity

- The measurements of the **Safety Index** demonstrate very **good confidence**.
- Safety index (PE/PL):

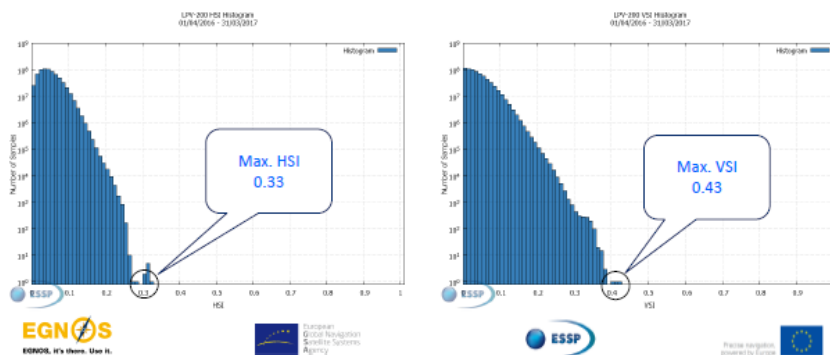


Figura 2.14: Integridad de LPV-200

Un diagrama Stanford es un gráfico en el que el error de posición está situado en el eje de abscisas y el nivel de protección en el eje de ordenadas. Está dividido en regiones por la diagonal representada al igualar ambos valores y por los niveles de alerta, ya sea horizontal o vertical. Reporta eventos de integridad y permite distinguir entre dos tipos: información engañosa (MI) e información altamente engañosa (HMI).

- MI: Ocurre cuando, habiendo sido declarado disponible, el sistema presenta un error de posición que excede el nivel de protección pero no el de alerta.
- HMI: Ocurre cuando, habiendo sido declarado disponible, el sistema presenta un error de posición que supera los niveles de alerta.

Hay diagramas de alerta tanto para la componente vertical como para la horizontal del error de posición. El eje diagonal separa las muestras en las cuales el error de posición es cubierto por el nivel de protección (sobre la diagonal) de aquellas en las que el error de posición excede dicho nivel (debajo de la diagonal). Los diagramas de Stanford permiten una comprobación rápida y fácil de la integridad, asegurando que todos los puntos muestreados permanezcan en la parte superior de la diagonal. Además, la proximidad de la nube de puntos a la diagonal, da una idea del nivel de seguridad, ya que la cercanía a la misma implica que un fallo de integridad va a suceder pronto.

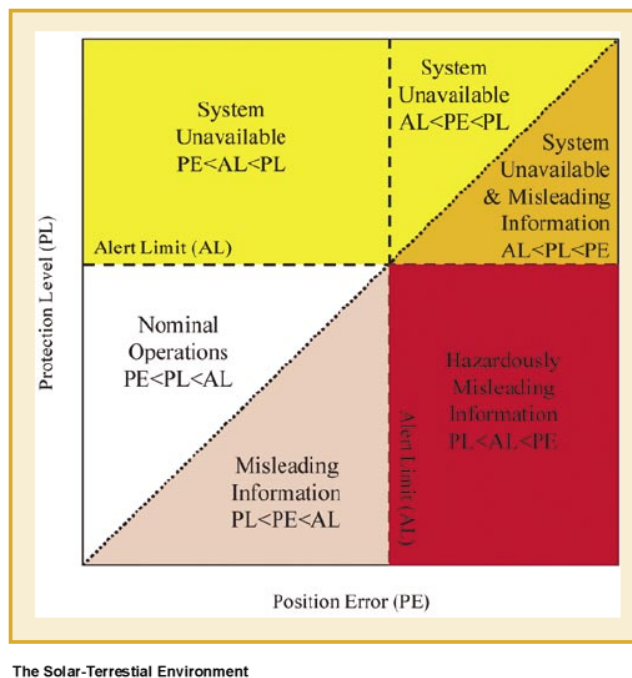


Figura 2.15: Diagrama de Stanford

Como ya se ha dicho, la diagonal de puntos discontinua representa el conjunto de puntos en los que el error de posición sería igual al nivel de protección.

En la zona superior, en la que el nivel de protección será siempre mayor que el error, existen dos zonas: la zona de operaciones normal en la que el nivel de protección además de ser mayor al error de posición es menor que el límite de alerta, siendo por tanto la zona óptima para las operaciones; y la zona de servicio no disponible, en la que el nivel de protección es mayor que el nivel de alerta, por lo que no se puede garantizar que se pueda realizar la operación y el sistema se encuentra no disponible.

Como ya se ha explicado anteriormente, en la zona inferior de la diagonal se encuentra la región en la que el error de posición será siempre mayor que el nivel de protección, lo que implica que el sistema carece de integridad. Se pueden distinguir dos zonas distintas en esta región: la zona de información engañosa (MI) en la que el error de posición es mayor que el de protección, pero menor que el límite de alerta, lo que hace que la operación sea peligrosa; y la segunda zona de información altamente engañosa (HMI), ya que, además de lo anterior, en este caso el error sí es mayor que el límite de alerta.

Continuidad

Se define la continuidad de un sistema como la probabilidad de que el funcionamiento del sistema especificado se mantenga a lo largo de la duración de una fase de una operación

determinada.

De este modo, en navegación aérea, se tiende a medir la continuidad como la probabilidad de que la capacidad operativa del sistema se mantenga sin interrupciones programadas durante un período de tiempo dado. Este período puede ser de quince segundos o de una hora, es decir, la probabilidad de que la continuidad se mantenga durante dicho periodo de tiempo expresado en percentil. Para aproximaciones de no precisión, se emplea el período de tiempo de una hora, ya que se trata de operaciones con menor nivel de criticidad. En cuanto a las aproximaciones de precisión, como las realizadas con LPV-200, se emplea el período de 15 segundos.

Además, es posible encontrar diversos tipos de errores de continuidad:

- **Fallos graves (*Hard Failures*):** Fallos que resultan en el cese de la emisión de la señal GNSS. Puede tratarse de cese repentino o de cese gradual. Éstos se dividen, a su vez, en dos grupos.
 - Fallos a largo plazo (LT): Son aquellos que resultan en una pérdida de la señal de forma irreparable. La solución suele ser reemplazar el satélite que lo ha generado mediante el lanzamiento de uno nuevo.
 - Fallos a corto plazo (ST): Son aquellos que resultan en una pérdida temporal de la señal, cuya solución es cambiar el satélite del que se recibe el mensaje mediante un sistema redundante en lugar del fallido.
- **Fallos por desgaste:** Se distinguen de los anteriores porque son, usualmente, predecibles. Son característicos de satélites que se encuentran en la fase operativa *end-of-life* (EOL), no de satélites lanzados recientemente o de “edad media”. Se trata de fallos LT.
- **Fallos leves:** Se trata de fallos de integridad, es decir, que el sistema continúe funcionando sin alerta de fallo de integridad. El Segmento de Control alerta de este tipo de errores tan pronto como sea posible tras la ocurrencia del evento.

La continuidad es el requerimiento en el que EGNOS obtiene peores resultados. Como se puede observar en la Imagen 2.16, la continuidad se encuentra por debajo del mínimo requerido por OACI ($10^{-4}/15$) en la mayoría del territorio, aunque no es así en determinadas zonas. Sin embargo, la misma OACI permite que se use un sistema de navegación que no cumpla del todo con este requisito si se toman medidas para compensar esa falta en los requerimientos.

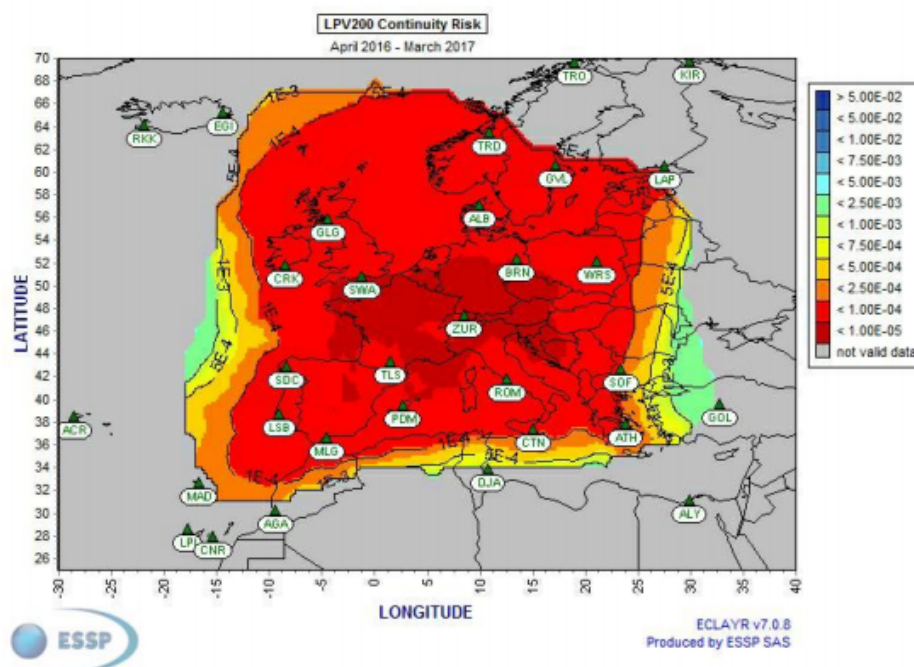


Figure 29: LPV-200 Continuity Risk from 01/04/16 to 31/03/17

Figura 2.16: Continuidad del sistema LPV-200

Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema es el porcentaje de tiempo en el que los servicios del sistema son utilizables para la navegación. Es una indicación de la capacidad del sistema para proveer un servicio utilizable dentro del área de cobertura. La disponibilidad de la señal es el porcentaje de tiempo en que las señales de navegación transmitidas desde fuentes externas, están disponibles para su uso. Es función tanto de las características físicas del entorno, como de las capacidades técnicas de las facilidades de transmisión.

Como ya se ha mencionado, se mide usualmente en forma de porcentaje que expresa el tiempo que el sistema es utilizable por un usuario, receptor o aplicación.

Se pueden realizar particularizaciones del concepto de disponibilidad considerando la disponibilidad de una señal utilizable proveniente de un satélite específico o bien, considerando la disponibilidad de posición, velocidad y tiempo de la constelación completa.

El primero de los casos se corresponde con el correcto funcionamiento del comportamiento del satélite. Sólo garantiza que el pseudorange del satélite sea conocido. Para el segundo caso, se requiere la posibilidad de realizar un bloqueo en la señal de, al menos, 3 satélites

2.5. Validación de procedimientos SBAS

Para poder llevar a cabo un procedimiento previamente diseñado, es necesaria la validación por parte de OACI (Organización de Aviación Civil Internacional). El proceso de validación consta de tres etapas que se describirán en mayor detalle a continuación. En cada una de ellas se realizan una serie de comprobaciones que verifican el cumplimiento de los requisitos exigidos al mencionado procedimiento.

Las tres etapas son: toma de datos a largo plazo, campaña sobre el terreno y ensayos de vuelo. El documento de OACI en el que se puede encontrar cómo llevar a cabo el procedimiento es el *doc 8071, volumen II "Manual on Testing of Radio Navigation Aids"*.

Como ya se ha mencionado, en el presente Apartado se pretende describir en resumen la naturaleza de las tres fases enumeradas.

2.5.1. Campaña de toma de datos a largo plazo

El primer paso a seguir para conseguir la certificación de un procedimiento es la campaña de toma de datos a largo plazo. Ésta consta en la toma de datos y estudio de los valores durante seis meses. Los requerimientos estudiados son continuidad, disponibilidad, precisión e integridad.

Pese a que puede parecer necesario el hecho de analizar dichos datos, no lo es. Esto se debe a que esta etapa consiste en la observación y estudio de los informes mensuales publicados acerca de las prestaciones EGNOS, disponibles de forma gratuita y de acceso libre en Internet, cuyo proveedor es ESSP (*European Satellite Services Provider*).

Para el caso presentado en este proyecto, se ha analizado desde noviembre de 2017 a abril de 2018.

2.5.2. Campaña sobre el terreno

A continuación, en la consecución del proceso de certificación, se realiza la campaña sobre el terreno. Ésta deber realizarse en el mismo lugar en el que se pretenden llevar a cabo las operaciones PBN (**Teruel** en este caso) y deben tener una duración de 36 horas como mínimo. Se toman datos desde distintas posiciones alrededor del emplazamiento y junto a la pista de aterrizaje. En este caso, la toma de datos se realiza durante 5 días. Sí es necesario, al contrario de lo que sucedía en la campaña de toma de datos a largo plazo, analizar los resultados mediante un programa como PEGASUS.

2.5.3. Ensayos de vuelo

La etapa final del proceso de certificación es la campaña sobre el terreno, es decir, un ensayo de vuelo. Esta etapa se realiza sólo en caso de haber obtenido resultados satisfactorios en las dos etapas anteriores. Con ella se comprueba que todo funcione correctamente y que no se produzcan problemas inesperados durante el aterrizaje.

Para ello, se realiza una primera aproximación al caso real. Esto implica volar la parte de la operación asistida por el servicio LPV-200 haciendo uso de un UAV. Gracias a ello, se pueden tomar los datos del ensayo de vuelo necesarios para validar el sistema SBAS en el aeropuerto en el que se quiera implantar.

Los datos obtenidos del ensayo deben procesarse mediante un *software* específico para ello. PEGASUS cumple tales funciones y puede realizarse la validación empleando el módulo *Dynamics*.

2.6. Formato, obtención y manipulación de datos

Para comenzar, se realizará una breve descripción de los formatos y protocolos de transmisión de datos existentes en el campo de los sistemas de navegación por satélite.

A la hora de escoger el formato de trabajo, se debe tener en cuenta, principalmente, el tipo de receptor GNSS que se tiene disponible y los formatos admitidos por el software a utilizar. Se hará especial hincapié en el formato RINEX, ya que es el aquel en el cual se encuentran los datos empleados en la realización de este proyecto.

Posteriormente, se describirá el proceso realizado para la obtención y manipulación de los datos necesarios para la campaña de validación, realizando la simulación con el software explicada en el siguiente apartado.

2.6.1. Formato RTCM

El formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritim Services*), es el conjunto de recomendaciones para la transmisión de correcciones diferenciales a los usuarios del sistema GPS.

Se empleó por primera vez en el año 1985 y se han ido realizando ligeras modificaciones en las versiones sucesivas de dicho formato. La más extendida es la 2.1.

El formato de datos RTCM para la transmisión de correcciones diferenciales GPS, se ha constituido como un estándar para todos los receptores GPS. Así, todos aquellos que puedan trabajar en modo diferencial, aceptan las correcciones diferenciales en este formato.

2.6.2. NTRIP

Cuyas siglas significan *Network Transport of RTCM via Internet Protocol*, constituye el protocolo de transmisión de datos a través de Internet. Envía a través de la telefonía móvil los datos encapsulados de las correcciones diferenciales.

2.6.3. Formato NMEA

El formato NMEA (*National Marine Electronics Association*) es un estándar utilizado para evitar incompatibilidades, como el ritmo de los datos y el formato de los mensajes entre dispositivos marítimos electrónicos. Se emplea, principalmente, para transmitir datos entre un receptor GPS/GNSS y otros dispositivos.

2.6.4. Formato RINEX

El formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) fue creado a finales de la década de los 80. Su objetivo era el de presentar e intercambiar los datos recibidos de diferentes tipos de receptores GPS de forma sencilla. Los archivos RINEX están escritos en formato ASCII, lo que garantiza su lectura por cualquier tipo de software.

En sus inicios, este formato se desarrolló para funcionar, exclusivamente, con datos del sistema americano GPS. No obstante, se ha ido adaptando para soportar también los datos del sistema ruso GLONASS o, ya recientemente, del sistema europeo Galileo, sin la necesidad de cambiar la estructura del formato.

Existen diferentes versiones del formato RINEX. La primera, fue denominada RINEX Version 1 y fue presentada en 1989. Permitía el intercambio de datos GPS entre diferentes receptores. Esta versión se mejoró al aparecer RINEX Version 2 en 1990, que añadió la posibilidad de recibir datos de otros sistemas de satélites como GLONASS o los geoestacionarios SBAS.

La versión empleada en este proyecto es la 2.10, modificación de la RINEX Version 2. Esta modificación permite, entre otros pequeños cambios, nuevos observables o la posibilidad de recibir datos a frecuencias que no sean números enteros.

El formato RINEX presenta actualmente cuatro ficheros:

- Fichero de observación.
- Fichero de navegación GPS.
- Fichero de datos meteorológicos.
- Fichero de navegación GLONASS.

De estos cuatro ficheros, se emplearán, únicamente, el fichero de observación y el fichero de navegación GPS, junto con el fichero SBAS. Todos ellos proporcionarán la información necesaria para la simulación.

La nomenclatura recomendada para todos los archivos RINEX es la siguiente: **ssssdddf.yyt**

Donde:

- **t**: tipo de archivo, pudiendo ser:

- 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 mixto.
 - B: archivo de emisión de datos SBAS.
 - C: archivo de reloj.
 - S: archivo de resumen.
- **yy**: los dos últimos dígitos del año correspondiente a la observación (1999: 99, 2018: 18).
 - **f**: secuencia de caracteres del día. Letra que indica en los ficheros horarios la hora de los datos recibidos.
 - a: primera hora: 00h-01h.
 - b: segunda hora: 01h-02h.
 - ...
 - x: vigésimo cuarta hora: 23h-24h.
 - **ddd**: día del año de la primera observación.
 - 001: 1 de enero.
 - 152: 1 de junio.
 - 365: 31 de diciembre.
 - **ssss**: 4 caracteres que designan el nombre de la estación. Para la estación situada en Teruel el código es T.

Ficheros de observación

Está dividido en dos secciones: la sección de cabecera y la sección de los datos. La estructura de la cabecera es igual para todos los ficheros y contiene la información obligatoria sobre la versión RINEX y el sistema de navegación utilizado, el nombre de la institución que

crea el archivo o la empresa fabricante de la antena receptora, por ejemplo.

En cada fichero se pueden encontrar los datos de una estación en una determinada sesión. Además, es posible concatenar varios de estos ficheros para obtener información procedente de varias estaciones o épocas o ambas.

Hay tres medidas fundamentales en los observables de GPS que son tiempo, pseudodistancia y fase:

- **Tiempo:** el tiempo de la medida es el tiempo del receptor de las señales recibidas. Es idéntico para las medidas de pseudodistancia y fase y para todos los satélites observados en una época determinada. Cuando hay observaciones de un único sistema GNSS en el fichero, el tiempo se expresa en el tiempo de dicho sistema por defecto. Pero, para observaciones de distintos sistemas de satélites, se indica el tiempo al comienzo del encabezado.
- **Pseudodistancia:** Es la distancia desde la antena receptora hasta la antena del satélite incluyendo los *offsets* del reloj del receptor y de la antena, entre otros factores. Hay varios tipos de pseudodistancias de acuerdo con el código y la frecuencia: la C1 (código C/A) sobre frecuencia L1, la P1 (código P sobre L1) y la P2 (código P sobre L2). Algunas de ellas pueden no recogerse dependiendo del receptor. Esto se debe a que el código P es de uso militar y está encriptado.
- **Fase:** Se mide en ciclos completos de portadora-fase sobre las frecuencias L1 o L2, y se llama de forma análoga. No es recomendable, debido a posibles ambigüedades, pero ciertos receptores pueden medirla en medios ciclos.

También se puede emplear en observaciones Doppler para receptores que dispongan de la lectura de observables D1 y D2.

La estructura del fichero de observación se muestra en las Tablas 2.1 y 2.2.

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION/TYPE	Versión de RINEX Tipo de fichero ("O" observ.) Sistema de satélite: 1. G: GPS 2. R: GLONASS 3. T: NNSS Transit. 4. M: Mixto
PGM/RUM BY/DATE	Programa de creación del fichero: - Agencia de la creación del fichero. - Día de la creación del fichero.
COMMENT	Comentarios.
MARKER NAME	Nombre del punto de observación.
MARKER NUMBER	Número del punto de observación.
OBSERVER/AGENCY	Nombre del observador y agencia.
REC #/TYPE/VERS.	Número del receptor, tipo y <i>software</i> .
ANT #/TYPE	Número y tipo de antena.
APROX POSITION XYZ	Posición absoluta aproximada del punto en la última época.
ANTENNA: DELTA H/E/N	Altura de la antena excentricidades relativas al este y al norte [m].
WAVELENGTH FACT L1/2	Factores para L1 y L2: - 1: Ciclo completo. - 2: Medio ciclo (cuadratura). - 0 en L2: Sólo una frecuencia. Número de satélites con estos factores. Lista de PRNs satélites.
#/TYPES OF OBSERV	Número de observables grabados. Tipos de observables grabados: - L1, L2: Medidas de fase L1 o L2. - C1: Pseudodist. con C/A en L1. - P1, P2: Ídem con P en L1 o L2. - D1, D2: Doppler en L1 o L2. - T1, T2: <i>Transit Integrated</i> . Las unidades de las medidas son: - Fase de ciclos enteros. - Pseudodistancia en metros. - Doppler en Hz. - Transit: ciclos.

Tabla 2.1: Fichero de observación RINEX (I)

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
INTERVAL	Intervalo de observación (épocas) en s.
TIME OF FIRST OBS	Tiempo de la primera época de grabación (año, mes, día, hora, minuto y segundo). Sistema de tiempo: - GPS: tiempo GPS. - GLO: tiempo UTC.
TIME OF LAST OBS	Tiempo de la última época de grabación. La estructura es análoga a la anterior.
LEAP SECONDS	Salto de segundos desde el 6/1/1980. Es recomendable su uso con datos mixtos.
END OF HEADER	Final de cabecera.
OBS RECORD	Época (año, mes, día, min., seg). Señal 0 (OK) o 1 (falta de sincronismo entre la época anterior y la actual). Número de satélites en la época actual. Lista de PRNs en la época actual. Valores de observables. Desfase del reloj del receptor.

Tabla 2.2: Fichero de observación RINEX (II)

Un ejemplo de un fichero de observación RINEX para este proyecto es el mostrado en la Imagen 2.18, TERU122A.18d.

```

1.0 COMPACT RINEX FORMAT CRINEX VERS / TYPE
RNX2CRX ver.4.0.7 02-May-18 01:04 CRINEX PROG / DATE
2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
20110ct11 IGN-E 20180502 01:04:47UTCPGM / RUN BY / DATE
2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|+= COMMENTBIT 2 OF LLI FLAGS
DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENTTERU
MARKER NAME13487M001
MARKER NUMBERArea de Geodesia Instituto Geografico Nacional
OBSERVER / AGENCY355165 LEICA GRX1200GGPRO 8.71/3.822
REC # / TYPE / VERS200565 LEIAT504GG LEIS ANT
# / TYPE 4867391.6750 -95523.9180 4108341.2560 APPROX
POSITION XYZ 0.0600 0.0000 0.0000 ANTENNA:
DELTA H/E/N 1 1 WAVELENGTH
FACT L1/2 6 L1 L2 C1 P2 S1 S2 # / TYPES OF
OBSERV 1.0000 INTERVALForced
Modulo Decimation to 1 seconds COMMENTDefault
COMMENTProject creator:
COMMENTServicio Programas Geodesicos
COMMENT SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT 2018 5
2 0 0 0.000000 GPS TIME OF FIRST OBS 15
LEAP SECONDS
END OF HEADER&18 5 2 0 0 0.000000 0
19G03G09G23G11G17G19G31G18G14G01G06G22R19R04R02R17R18R12R033&107717897088
3&83936048165 3&20498025900 3&20498026560 3&52250 3&51750 8483&120435058210
3&93845500285 3&22918028800 3&22918029280 3&47250 3&42000 7473&110735088795
3&86287083730 3&21072185720 3&21072181720 3&51000 3&48500 8483&115938571331
3&90341752037 3&22062369600 3&22062367140 3&49000 3&43250 8473&115051572425
3&89650550769 3&21893582960 3&21893580900 3&51250 3&46750 8473&118284745901
3&92169924111 3&22508837400 3&22508833240 3&47500 3&44250 7473&127570916962
3&99405894048 3&24275935460 3&24275934120 3&44250 3&36750 7463&120503810391
3&93899101129 3&22931101560 3&22931100540 3&46500 3&40750 7463&130507435296
3&101694103704 3&24834737220 3&24834734880 3&39000 3&35500 6453&111441800887
3&86837794430 3&21206661680 3&21206662940 3&51500 3&49750 8483&127575597273
3&99409564609 3&24276829180 3&24276830480 3&41750 3&36000 6463&114520468348
3&89236755547 3&21792509640 3&21792504960 3&50250 3&47000 8473&107602072125
3&83690511443 3&20115068400 3&20115071480 3&50250 3&49250 8 83&108281133129

```

Figura 2.18: Fichero de observación para la estación de Teruel

Que sigue la estructura de los archivos RINEX de observación.

Ficheros del mensaje de navegación

Cada sistema de navegación (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) presenta un fichero de navegación. No obstante, todos siguen la misma estructura y contienen el mismo tipo de información.

En el fichero de mensaje de navegación se pueden encontrar los parámetros del reloj, los datos orbitales y la precisión de las medidas de pseudodistancia de los satélites observados. Además, pueden contener en la cabecera información sobre los parámetros del modelo ionosférico o términos de correcciones relacionados con el tiempo GPS y UTC10.

Un ejemplo de un fichero de mensaje de navegación GPS podría ser el mostrado en la

Imagen 2.19.

```

2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
teqc 20110ct11  IGN-E          20180502 01:04:47UTC / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|=+ COMMENT
          END OF HEADER 1 18 5 2 0 0 0.0-
4.468159750104D-05-2.728484105319D-12 0.000000000000D+00 9.600000000000D+01
5.687500000000D+00 4.324108626719D-09 1.932488464816D+00 3.278255462646D-07
7.666676887311D-03 1.047737896442D-05 5.153673265457D+03 2.592000000000D+05-
2.235174179077D-07-2.247735393967D+00 7.078051567078D-08 9.709105636478D-01
1.843750000000D+02 6.169443637177D-01-7.807468449528D-09 5.332365105026D-10
1.000000000000D+00 1.999000000000D+03 0.000000000000D+00 2.800000000000D+00
0.000000000000D+00 5.587935447693D-09 9.600000000000D+01 2.592000000000D+05 2
18 5 1 16 0 0.0 1.282300800085D-04-1.125499693444D-11 0.000000000000D+00
5.100000000000D+01 1.918750000000D+01 4.515188223309D-09-1.927932278141D+00
1.015141606331D-06 1.788241090253D-02 1.010857522488D-05 5.153727609634D+03
2.304000000000D+05 4.172325134277D-07-2.308088218304D+00 1.862645149231D-08
9.500007039597D-01 1.770312500000D+02-1.862674209023D+00-7.708892191260D-09
5.582375117719D-10 1.000000000000D+00 1.999000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-2.048909664154D-08 5.100000000000D+01
2.592000000000D+05 3 18 5 2 0 0.0 6.210431456566D-05 7.617018127348D-12
0.000000000000D+00 8.200000000000D+01-3.937500000000D+00 4.978778722631D-09
1.056781040246D+00 -1.806765794754D-07 1.323713222519D-03 4.779547452927D-06
5.153759660721D+03 2.592000000000D+05 3.725290298462D-09-1.204572710786D+00
2.793967723846D-08 9.605197227819D-01 2.852812500000D+02 4.349237689836D-01-
8.260701456209D-09 -1.603638194458D-10 1.000000000000D+00 1.999000000000D+03
0.000000000000D+00 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 2.328306436539D-09
8.200000000000D+01 2.592000000000D+05 5 18 5 1 18 0 0.0-8.762348443270D-06
7.958078640513D-13 0.000000000000D+00 1.800000000000D+01-5.156250000000D+00
5.230575084170D-09 1.774976824235D+00 -2.831220626831D-07 5.324500962161D-03
4.645437002182D-06 5.153682474136D+03 2.376000000000D+05-7.078051567078D-08-
1.225871086406D+00-5.587935447693D-09 9.474121523418D-01 2.853437500000D+02
6.100021942285D-01-8.431065623427D-09 -9.286101054773D-11 1.000000000000D+00
1.999000000000D+03 0.000000000000D+00 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-
1.117587089539D-08 1.800000000000D+01 2.592000000000D+05 6 18 5 2 0 0 0.0
4.059267230332D-04-2.160049916711D-12 0.000000000000D+00 1.110000000000D+02
2.343750000000D+00 4.350181104229D-09 2.107797704886D+00 2.831220626831D-07
1.212813192979D-03 9.629875421524D-06 5.153615146637D+03 2.592000000000D+05
4.284083843231D-08-2.256063641763D+00-8.381903171539D-08 9.706381170993D-01

```

Figura 2.19: Fichero de navegación para la estación de Teruel

Por su parte, la estructura normal de un fichero de mensaje de navegación es la mostrada en la Tabla 2.3.

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION/TYPE	Formato y tipo de fichero ("N" Naveg.).
PGM/RUM BY/DATE	Nombre, agencia y día de creación.
COMMENT	Comentarios.
ION ALPHA	Parámetros ionosféricos A0-A3 del almanaque.
ION BETA	Parámetros ionosféricos B0-B3.
DELTA-UTC: A0, A1, T, W	Parámetros del almanaque para calcular el tiempo en el sistema UTC: - A0, A1: Términos de polinomio. - T: Tiempo de referencia para datos UTC. W: Número de la semana UTC de referencia.
LEAP SECONDS	Error en el tiempo por el salto de segundo.
OBS. RECORD	
Grupo 1	- Número PRN, año, mes día, hora, min., seg. - Error del reloj de satélite [s]. - Deriva del reloj de satélite [s/s]. - Período de la deriva.
Grupo 2	- Edad de las efemérides [s]. - Corrección Crs [m]. - Diferencia media de movimiento [rad/s]. - Anomalía media [rad].
Grupo 3	- Corrección Cuc [rad]. - Excentricidad. - Corrección Cus [rad]. - Raíz cuadrada del semieje mayor [$m^{1/2}$].
Grupo 4	- Tiempo de las efemérides [s de semana GPS]. - Corrección Cic [rad]. - Nodo de longitud (Ω) [rad]. - Corrección Cis [rad].
Grupo 5	- Inclinación [rad]. - Corrección Crc [m]. - Argumento del perigeo (ω) [rad]. - Velocidad del nodo de longitud ($\dot{\Omega}$) [rad/s].
Grupo 6	- Velocidad de inclinación (\dot{I}) [rad/s]. - Códigos en el canal L2. - Semana GPS. - Aviso de datos de código P en L2.
Grupo 7	- Precisión del satélite [m]. - Salud del satélite (entrada MSB). - Retardo ionosférico (TGD) [s]. - Edad de los datos del reloj [s].
Grupo 8	- Tiempo de transmisión del mensaje [s de semana GPS]. - De repuesto/sin información. - De repuesto/sin información. - De repuesto/sin información.

Tabla 2.3: Fichero de navegación RINEX

2.6.5. Obtención de datos

Tras la explicación del formato y estructura de los ficheros de datos que se necesitan en la realización del proyecto, se procede a la obtención de dichos datos GNSS. Para ello, se hace uso del organismo internacional para la obtención de datos GNSS: *International GNSS Service (IGS)*, una federación integrada por más de 200 agencias que proveen recursos y datos para los usuarios en todo el mundo.

En España existe una agencia encargada del almacenamiento de datos GNSS: el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Existe una red de estaciones permanentes GNSS, conocidas como ERGNSS, que cubren todo el territorio nacional y que ha sido desarrollada por el área de geodesia del IGN.


Los objetivos de esta red son:

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos sistemas de referencia globales en España.
- Ser puntos fundamentales de la Red Europea de estaciones permanentes (EPN: *European Permanent Network*).
- Utilización de los registros de datos para estudios troposféricos, ionosféricos, meteorológicos, etc.
- Definir una red fundamental para apoyar aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales.
- Proporcionar a los usuarios GNSS datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.

A día de hoy, dicha red se compone de 48 estaciones. De entre estas estaciones, 20 están integradas en la red europea de EUREF y 2 en la red mundial del IGS.

Para la realización del proyecto los datos se han obtenido de la estación permanente situada en Teruel con código TERU.

Las coordenadas del emplazamiento de la antena de la estación que se emplearán en la simulación posterior se encuentran en la reseña de la misma. Dichas coordenadas son N 040° 21' 01.79", W 001° 07' 27.48".



Área de Geodesia
Subdirección General de Geodesia y Cartografía

Reseña de Estación Permanente - ERGNSS 12-may-2018

Situación:

Código.....: TERU	Municipio: Teruel
Nombre.....: Teruel	
Código IERS: 13487M001	Provincia: Teruel
Instalación...: 06 de marzo de 2008	


Localización.: Observatorio Meteorológico de Teruel, Avda. de Zaragoza, s/n
Teruel

Construcción: Pilar de hormigón armado de 3 m de altura.
Placa en la parte de arriba.

Coordenadas ETRS89:

Longitud.....: - 1° 07' 27,48471"	X.....: 4867301.675 m.
Latitud.....: 40° 21' 01,78981"	Y.....: -95523.918 m.
Altitud elipsoidal: 956.167 m.	Z.....: 4108341.256 m.

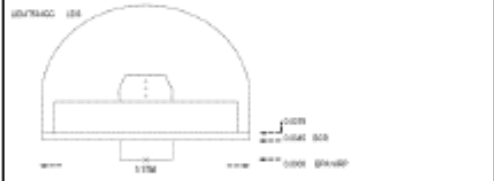
X UTM.....: 850202.121 m.	Altitud sobre el nivel medio del mar:
Y UTM.....: 4488348.868 m.	
Huso.....: 30	904.152 m.




Instrumentación:

Receptor: GRX12000GPRO
Antena: LEIAT504GG LEIS Altura: 0.0600 m. (BPA)
Offset de centros de fase de antena: L1 0.067 m. L2 0.118 m.

Esquema antena





Información adicional:

Esta estación permanente, además de a la red ERGNSS, pertenece a la siguiente red:
- Red de EUREF Permanent Network (EPN): <http://www.epncb.com/be>

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

Emite correcciones diferenciales a través del Caster <http://castor-ign.ign.es> a través de los puntos de montaje:
- TERU0 formato de la corrección RTCM versión RTCM 3.1
- TERU1 formato de la corrección RTCM versión RTCM 2.3

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

Observaciones:

Figura 2.20: Ficha de la estación ERGNSS de Teruel

2.6.6. Servidor FTP

Existe un servidor FTP (*File Transfer Protocol*), dispuesto por el IGN, que permite el acceso público a los datos de las estaciones. De este modo, se pueden descargar datos a distintas frecuencias y en ficheros diarios u horarios para aplicaciones GNSS de post-proceso.

Dependiendo de la frecuencia a la que se toman los datos y de su fecha, existen distintas carpetas de organización. En este caso, se han tomado archivos RINEX con datos tomados con una frecuencia de una toma por segundo, por lo que el directorio al que se accederá para ello es el que lleva por nombre horario_1s y, una vez en él, se seleccionan las fechas de los días deseados. En el caso estudiado, dichos días son del 1 al 5 de mayo de 2018, lo que se traduce en fecha GPS de los días 121 al 125 de la estación situada en Teruel cuyo nombre es TERU.

Los archivos se encuentran organizados de forma horaria en el FTP del IGN, lo que complica la tarea de obtención de los ficheros. Se deben descargar tanto los ficheros de navegación como los de observación para las 24 horas de los 5 días que ocupa la simulación, lo que implica que el total de archivos descargados sea de 240. Además, la organización no se realiza alfabéticamente, por lo que la tarea de descarga resulta tediosa y complicada. El directorio se muestra en la Imagen 2.21.

VALE121D.18d.Z	526 kB	1/5/18 8:02:00
MENC121L.18d.Z	618 kB	1/5/18 16:04:00
CSOS121X.18N.Z	4.1 kB	2/5/18 4:02:00
VALC121J.18S	18.1 kB	1/5/18 14:05:00
LRES121R.18G.Z	4.4 kB	1/5/18 22:03:00
CAZA121R.18S	18.8 kB	1/5/18 22:02:00
TARR121H.18S	19.6 kB	1/5/18 12:04:00
ACNS121J.18G.Z	3.4 kB	1/5/18 14:01:00
SINE121P.18S	18.0 kB	1/5/18 20:04:00
TRAU121D.18d.Z	447 kB	1/5/18 8:04:00
EIV1121V.18N.Z	6.8 kB	2/5/18 2:04:00
ONOR121N.18G.Z	3.3 kB	1/5/18 18:02:00
SNTG121J.18S	18.6 kB	1/5/18 14:05:00
LPAL121D.18d.Z	383 kB	1/5/18 8:03:00
TERU121W.18d.Z	411 kB	2/5/18 3:04:00
IBIZ121I.18d.Z	570 kB	1/5/18 13:03:00
RAEG121A.18S	18.5 kB	1/5/18 5:02:00
CACE121J.18d.Z	605 kB	1/5/18 14:03:00
VALA121C.18S	23.4 kB	1/5/18 7:05:00
CARV121J.18S	18.8 kB	1/5/18 14:04:00
MOFR121O.18G.Z	3.2 kB	1/5/18 19:05:00
BCL1121I.18G.Z	4.7 kB	1/5/18 13:03:00
EIV1121S.18N.Z	8.6 kB	1/5/18 23:04:00
MENC121C.18d.Z	606 kB	1/5/18 7:04:00
ALOR121X.18N.Z	7.0 kB	2/5/18 4:03:00
ALBO121U.18N.Z	6.4 kB	2/5/18 1:03:00
LALA121C.18d.Z	729 kB	1/5/18 7:03:00
VALC121P.18S	17.8 kB	1/5/18 20:06:00
ALBA121D.18d.Z	522 kB	1/5/18 8:01:00

Figura 2.21: Servidor FTP del IGN

Existe otro método más rápido y efectivo para la descarga de los archivos RINEX. Dicha alternativa se encuentra en la descarga del Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG), un software libre del IGN.

El uso de esta aplicación es sencillo, ya que basta con seleccionar en el mapa la estación deseada (TERU), la hora y la fecha, así como la frecuencia de toma de datos. Una vez realizada esta tarea, el programa descarga 2 ficheros: uno de observación y otro de navegación, para la fecha y hora seleccionadas. Gracias al uso de este programa, el ahorro de tiempo ha sido considerable y se han descargado los archivos en formato .n de mensaje de navegación y .d de observación en formato comprimido Hatanaka.

La Imagen 2.22 muestra la interfaz del programa.

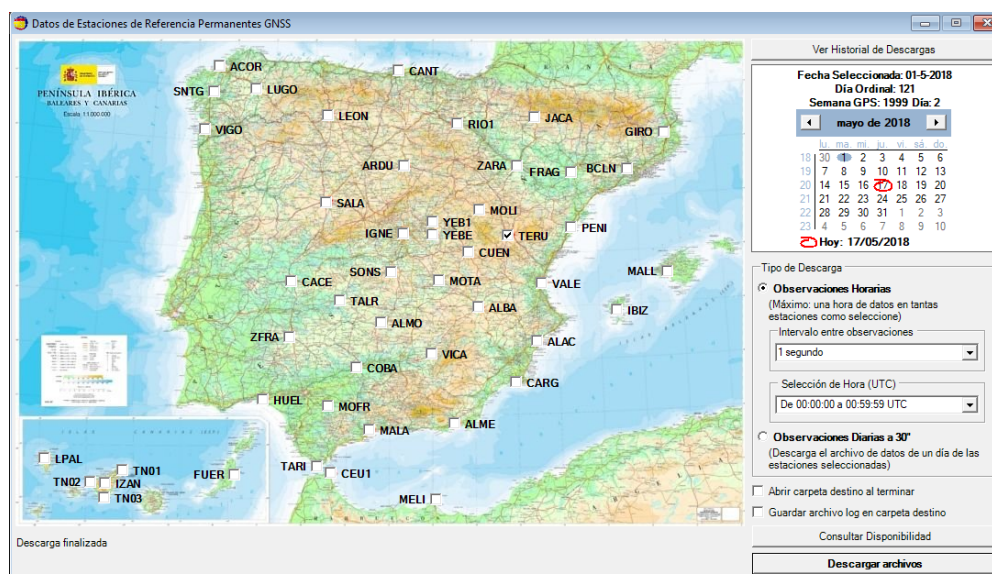


Figura 2.22: Interfaz del software PAG del IGN

2.6.7. Ficheros SBAS

Al no presentar las prestaciones suficientes para validar un procedimiento de tipo LPV-200, GPS requiere el uso de un sistema de aumentación que mejore dichas prestaciones (precisión, integridad, continuidad y disponibilidad). En este caso se trata del sistema Europeo EGNOS, como ya se ha mencionado anteriormente.

El sistema encargado de guardar y suministrar los datos a los usuarios para EGNOS es EDAS (EGNOS Data Access System).

Dicho servicio ofrece datos comerciales terrestres y soporta el uso de varias constelaciones

GNSS, entre las cuales se encuentra Galileo, mediante la difusión de los servicios de EGNOS en tiempo real. Los datos de EGNOS se proporcionan en distintos formatos, siguiendo siempre el estándar RTCM.

Para la obtención de dichos datos, es preciso ponerse en contacto con el servicio de EGNOS Helpdesk, en el que se solicita un usuario y contraseña que permite el acceso al FTP de EDAS en el que se encuentran los datos SBAS en diferentes formatos. A continuación, se debe instalar un programa de ayuda y visualización de directorios de la FTP, llamada en este caso WinSCP, que permite un acceso más sencillo y ordenado a los archivos mencionados.

En este directorio, el orden es, inicialmente, cronológico, siendo necesario seleccionar el año seguido del día (en calendario GPS) necesario para la simulación. Tras esto, se debe elegir entre las estaciones disponibles para descargar y el formato deseado para el archivo.

De entre los formatos ofrecidos por EDAS, es necesario el tipo .b. Es posible, además, descargarlos en formato .ems o los datos en raw. Cabe destacar que los archivos RINEX SBAS en formato .b son diarios, por lo que constituye una gran ventaja con respecto a los ficheros de observación y navegación. Hay un total de 5 ficheros SBAS para toda la simulación en comparación a los 120 de observación y de navegación.

La Imagen 2.23 muestra la interfaz del FTP de EDAS.

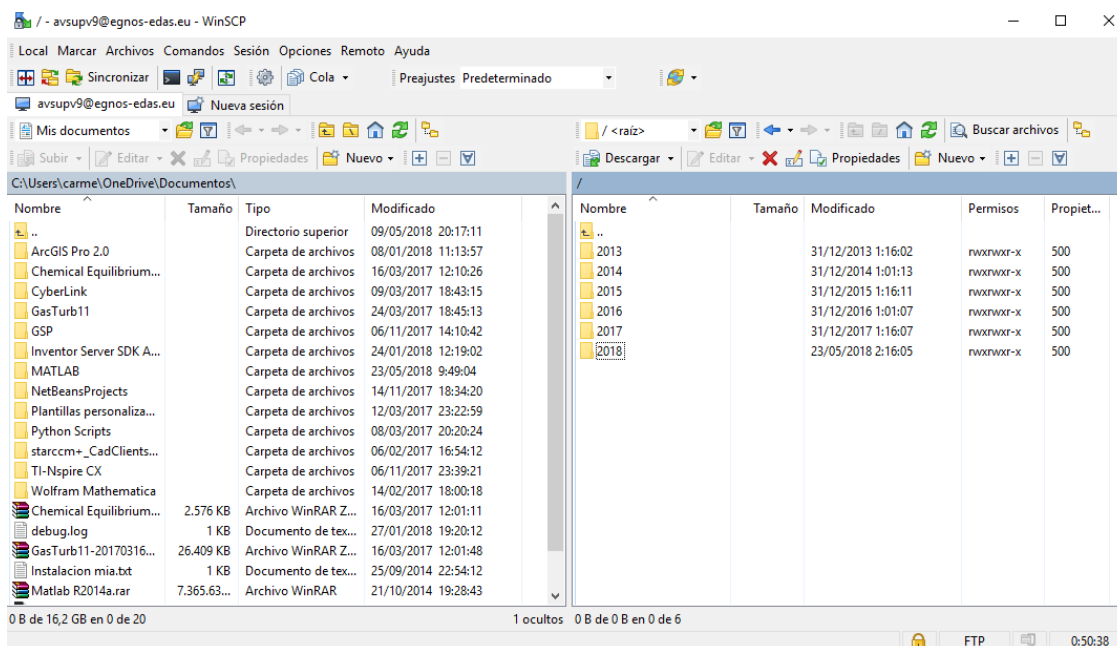


Figura 2.23: Interfaz del FTP de EDAS

Los archivos siguen la nomenclatura **brdcddd0.yyB.Z**.

Donde:

- **ddd**: es el día del año de los datos del archivo, en este caso del 121 al 125.
- **yy**: son los dos últimos dígitos del año de recogida de los datos, en este caso el 18.

Por lo tanto, una vez descargados estos datos del FTP de EDAS, se posee ya todo lo necesario para la segunda etapa del proceso de validación de procedimientos de la campaña sobre el terreno.

- Ficheros de observación: en formato comprimido Hatanaka .d TERU12[1-5][A-X].18d que suman un total de 120.
- Ficheros de mensaje de navegación: en formato .n TERU12[1-5][A-X].18n.
- Ficheros SBAS: en formato .b (**BRDC12[1-5]0.18b**).

Con todo esto, se comienza con la manipulación de datos introducidos en el programa de simulación. Para ello se ha hecho uso de los programas Hatanaka y TEQC.

2.6.8. Hatanaka

Para descomprimir los archivos de observación en formato comprimido de tipo .d y convertirlos en tipo .o, es necesario el uso de la herramienta Hatanaka. Se trata de un software libre del que se hace uso mediante la ventana de comandos de Windows. Su utilización es bastante sencilla, ya que posee dos comandos principalmente: el crx2rnx, para descomprimir los archivos, y el rnx2crx para comprimirlos.

Para ejecutar los comandos de la consola, es necesario que todos los archivos se encuentren en la misma carpeta que la de instalación de HATANAKA, por lo que se copiaron los archivos descargados del IGN a dicha carpeta. Una vez realizado este proceso, se ejecuta el comando crx2rnx para cada uno de los 120 archivos de observación con la finalidad de descomprimirlos. El espacio ocupado en disco es mucho mayor una vez se han descomprimido. La Imagen 2.24 muestra los comandos introducidos en la ventana de comandos de Windows para la descompresión de archivos.

de comandos para los archivos, permitiendo desde controles de calidad hasta eliminar las observaciones de sistemas de satélites no deseados u ordenarlas de una determinada manera. Entre las funciones del programa se empleará la de concatenación de los archivos RINEX. En la Imagen 2.25 muestra la ventana de comandos ejecutando la compilación.

Existe un error en la concatenación de archivos, ya que para cada archivo concatenado genera una cabecera. Esto implica que la lectura del fichero no funcione como es correcto. Para solucionar dicho problema, se debe abrir el fichero como archivo de texto y borrar, una a una, las cabeceras innecesarias.

Al pasar el archivo por el comando `teqc +qc`, que evalúa la calidad del fichero analizado, se descubrió que había errores en los datos recogidos en algunos satélites. Si, además, se emplea el comando `teqc +qcq +sym input > output 2> &1`, se puede estudiar el error acaecido. Se trataba de información no recogida, con lo que se puede considerar que el archivo se concatenó correctamente y que los errores son de la propia estación, no de la concatenación.

El resultado es un conjunto de 15 archivos, 10 de ellos resultantes de la concatenación de los ficheros RINEX y 5 descargados del FTP de EDAS.

2.7. PEGASUS

El programa del que se va a hablar a continuación, desarrollado por EUROCONTROL, es uno de los empleados para el desarrollo del proyecto. Permite el análisis de los datos recibidos tanto de sistemas SBAS como GBAS.

Posee una serie de herramientas para asistir a los usuarios de los sistemas de navegación aérea para la evaluación del comportamiento de las señales en el espacio de los satélites y su aumentación. Entre estas herramientas se encuentra determinación de los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, errores de trayectoria o simulaciones de algoritmos de procesamiento de las estaciones de tierra. También permite conocer los errores de navegación en caso de analizarse datos en vuelo.

La Imagen 2.26 muestra la interfaz principal del *software*.

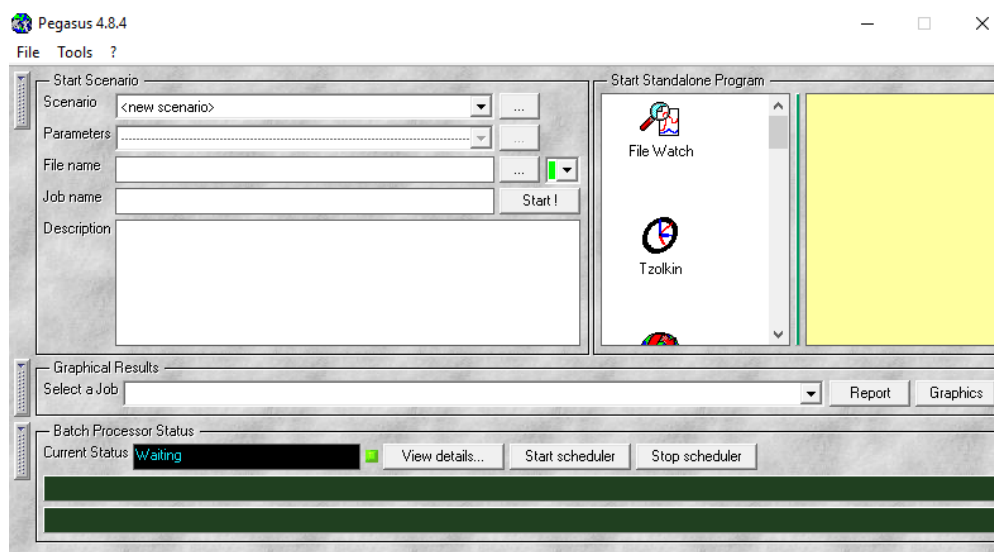


Figura 2.26: Interfaz del software PEGASUS de Eurocontrol

El programa hace uso de distintos módulos para distintas funciones, que se explican a continuación y que corresponden a módulos de soluciones GNSS para mensajes de datos SBAS de EGNOS y gráficas para analizar su comportamiento.

Existen distintos escenarios para la simulación proporcionados por EUROCONTROL para la comprensión del software PEGASUS. Antes de la simulación definitiva, se realizaron los tutoriales para los distintos escenarios proporcionados. En cuanto a la experiencia con el programa para la realización de este TFM, los problemas obtenidos y su solución se detalla en el último punto de este apartado.

2.7.1. Módulo Convertor

La primera etapa de un proyecto en Pegasus es el módulo convertidor, o *convertor*, cuya función es la toma de datos introducidos del receptor GNSS y traducirlos a un formato genérico para su análisis. Hace uso de *inputs* de diferentes receptores GNSS, SBAS en este caso, para convertirlos en formato ASCII. La Imagen 2.27 muestra la interfaz de dicho módulo.

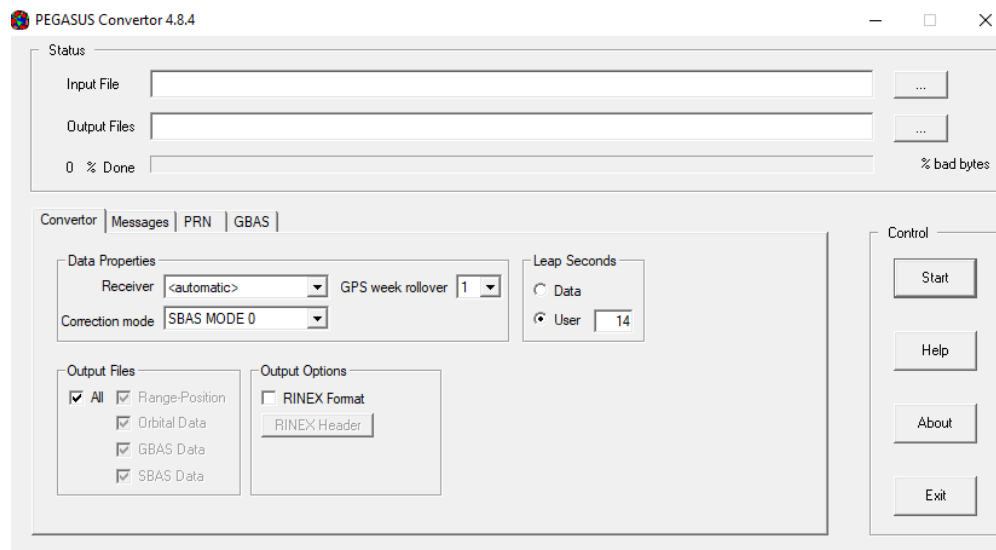


Figura 2.27: Interfaz del módulo Convertor de PEGASUS

Para este proyecto, se han introducido los datos recogidos para la estación TERU (Teruel). Como entrada se seleccionan los ficheros de observación RINEX, siendo el propio módulo el que busca el resto de ficheros (navegación y SBAS) con el mismo nombre que el introducido. Para que el programa sea capaz de ello, se ha cambiado el nombre de los ficheros SBAS a TERU12x0.18b, siendo x el día GPS. Esto permite generar un único archivo que, posteriormente, se introducirá en el módulo *GNSS Solution* explicado a continuación.

2.7.2. Módulo GNSS Solution

Para realizar los cálculos a partir de los datos obtenidos del convertidor se emplea el módulo *GNSS_Solution*. Con ello, es posible obtener la posición y XPLs (ficheros de configuración de los distintos niveles de protección). Tras su ejecución, el programa podrá usar los módulos gráficos para visualizar los resultados.

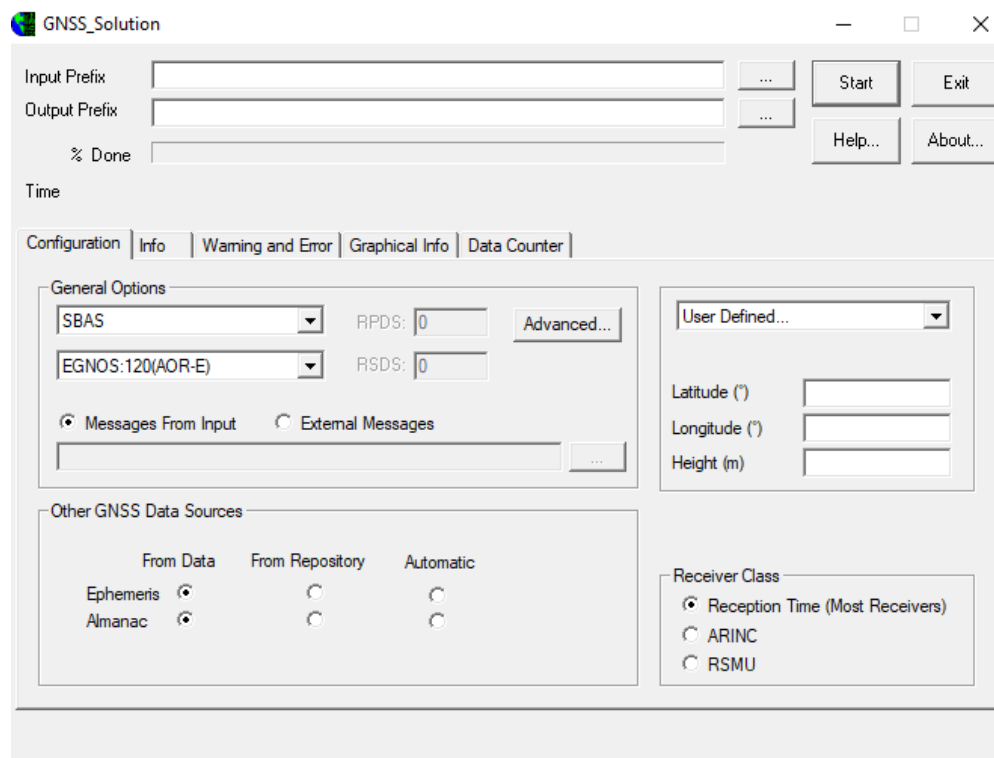


Figura 2.28: Interfaz del módulo GNSS Solution de PEGASUS

En este módulo, se deben introducir los archivos generados por el *Convertor*. Se trata de un proceso lento que precisa de una gran cantidad de tiempo para completarse. Se ha ejecutado 5 veces, una por cada día, lo que ha supuesto un gran inversión de tiempo. Para su correcto funcionamiento, es necesario pedir al programa que prescinda del almanaque, de la misma manera que se ha debido cambiar en *General Options* la opción a SBAS. Por otro lado, es necesario introducir las coordenadas de la estación de Teruel para conseguir los resultados deseados. Este módulo generará, de nuevo, otro archivo que deberá introducirse en el *MFile Runner*, explicado en el apartado 2.7.3.

2.7.3. Módulo MFile Runner

Para visualizar los resultados obtenidos para poder analizar los datos mediante gráficas, es necesario el módulo *MFile Runner*. Gracias a dichas gráficas es posible evaluar los datos GPS/SBAS de forma estandarizada. Para el caso de la visualización de los datos SBAS, el módulo genera gráficas con correcciones rápidas, lentas, ionosféricas y estadísticas de la señal en el espacio.

- **Análisis de las correcciones lentas SBAS:** Analiza la máscara PRN y evalúa los datos de las correcciones lentas. Genera gráficas interactivas de tiempo y estadísticas de las correcciones lentas para los satélites contenidas en la máscara PRN.

- **Análisis de las correcciones ionosféricas SBAS:** Analiza la máscara IGP y evalúa los retrasos verticales de la señal. Genera gráficas de los retrasos y de un mapa para todo el área geográfica.
- **Distribución del mensaje SBAS:** Analiza la distribución en cantidad, tiempo y frecuencia de emisión de los mensajes. Genera una tabla con el número de mensajes emitidos y muestra la distribución del mensaje y gráficos de diferencias de tiempo.

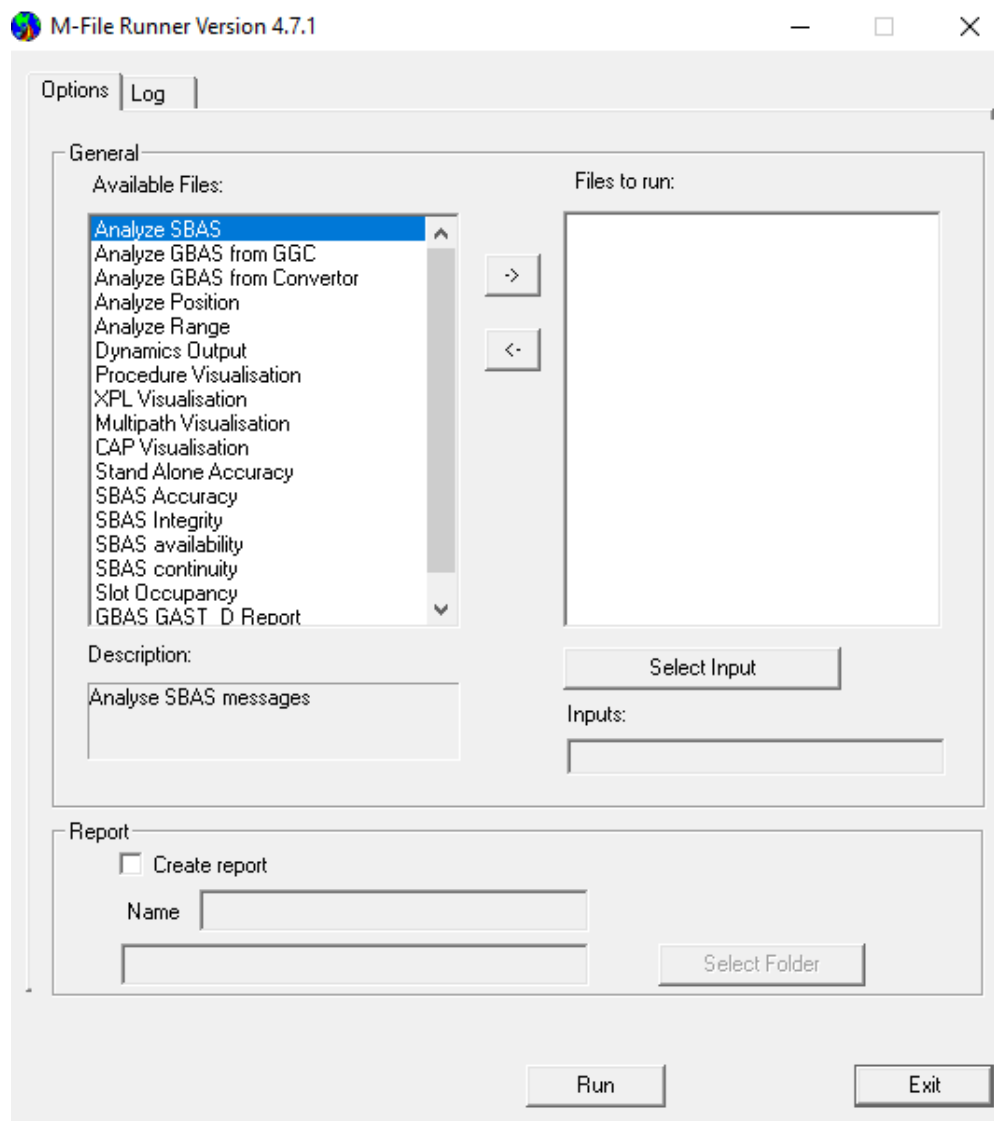


Figura 2.29: Interfaz del módulo MFile Runner de PEGASUS

La obtención de los datos en forma de resultados y gráficas permite analizar la simulación EGNOS.

En este proyecto, se han generado las gráficas de integridad del sistema, que incluyen dos diagramas de Stanford, uno para la posición vertical y otro para la horizontal, así como la representación del HSI y del VSI. Nuevamente, se ha debido ejecutar el módulo 5 veces, una por cada día. También se han obtenido los valores de HSNE y VSNE para cada uno de los 5 días, los histogramas con los resultados para HPE, VPE, HPL, VPL para los cinco días y un resumen con los valores de continuidad, disponibilidad e integridad. Se ha hecho uso de las opciones *Analyze Position*, *SBAS accuracy* y *SBAS integrity*. Con ello, se puede afirmar que se han obtenido los resultados necesarios para comprobar si se cumplen los requerimientos.

2.7.4. Módulo XPL Estimation

Finalmente, para obtener los datos relativos a la disponibilidad y continuidad, ha sido necesario hacer uso del módulo *XPL Estimation*. Con ello, ha sido posible la finalización de la campaña de toma de datos sobre el terreno, dado que las funciones de *SBAS availability* y *SBAS continuity* no devolvían los resultados deseados.

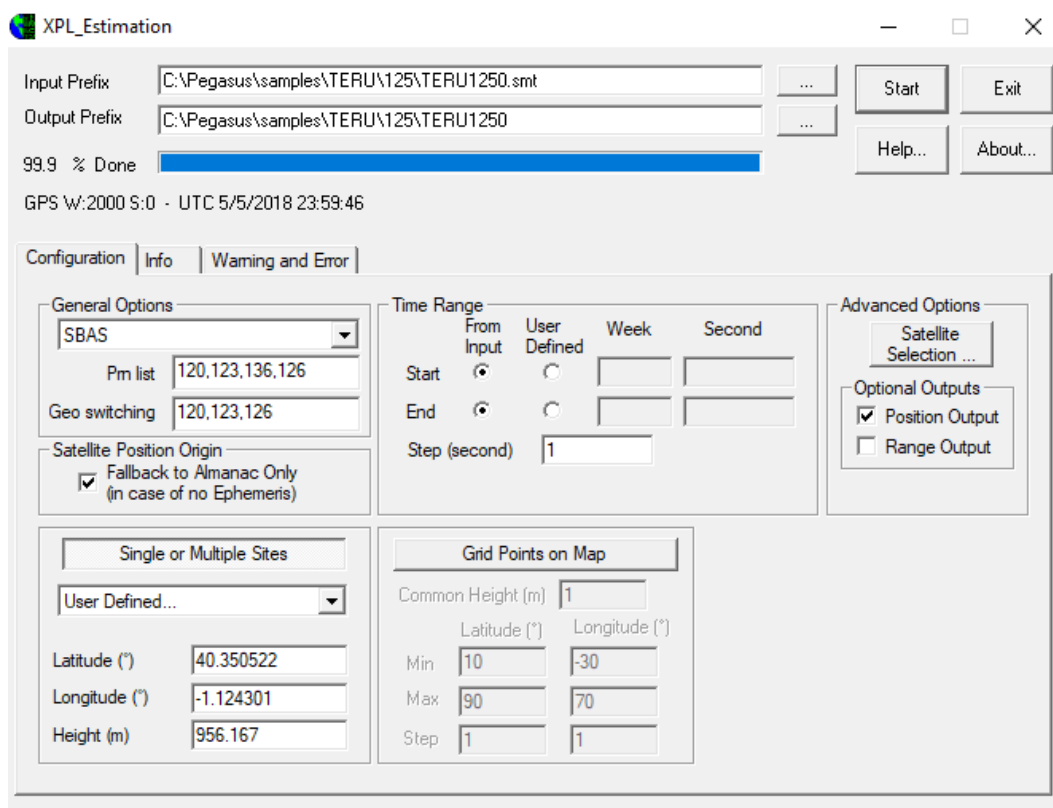


Figura 2.30: Interfaz del módulo XPL Estimation de PEGASUS

La ejecución del programa devuelve archivos de extensión .stat, en el que se encuentran las estadísticas del sistema. Se analizan los resultados para los distintos servicios ofrecidos

por EGNOS, interesando, en este caso, el servicio LPV-200.

La correcta configuración del módulo implica que se ajusten los siguientes campos tal y como se indica:

- *General Options*: Se debe seleccionar la opción de SBAS.
- *User Defined*: Se deben incluir las coordenadas de la estación TERU.
- *Prn list*: El módulo se ejecuta una vez por cada uno de los satélites geoestacionarios de EGNOS que permanezcan activos. En este campo se deben introducir dichos satélites.

Cabe destacar que, para el correcto funcionamiento del módulo, ha sido necesario descargar los almanaques GPS para los 5 días de observación sobre el terreno. Dichos archivos tienen la extensión .alm y contienen información relativa a la constelación de satélites. La Imagen 2.31 muestra un fragmento del mismo.

```
***** Week 975 almanac for PRN-01 *****
ID:                01
Health:            000
Eccentricity:      0.7678985596E-002
Time of Applicability(s): 405504.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9709702908
Rate of Right Ascen(r/s): -0.7588887536E-008
SQRT(A) (m 1/2):   5153.626465
Right Ascen at Week(rad): -0.2248870513E+001
Argument of Perigee(rad): 0.617967306
Mean Anom(rad):    -0.1861643354E+001
Af0(s):            -0.4482269287E-004
Af1(s/s):          -0.3637978807E-011
week:              975
```

Figura 2.31: Fragmento del archivo de almanaque GPS

2.8. Resultados obtenidos

De los análisis realizados a partir de los datos obtenidos a través de las distintas fuentes, se exponen los resultados alcanzados en el presente apartado. Como ya se ha mencionado en la Sección 2.5, hay distintas fases en el proceso de validación. Por ello, se recogen los resultados para las realizadas en el proyecto.

2.8.1. Campaña de toma de datos a largo plazo

Se trata de la primera de las etapas para la validación de un procedimiento PBN según la normativa OACI. Como ya se ha mencionado, se ha realizado en un período de 6 meses que abarca desde noviembre de 2017 a abril de 2018. Se analizan los resultados para la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad GNSS/SBAS y se verifica el cumplimiento de los requerimientos.

Los datos se han extraído de la página web de ESSP (*European Satellite Services Provider*), proveedor del servicio de EGNOS y que incluye en sus informes mensuales estadísticas de los resultados de rendimiento.

Los resultados se recogen en los apartados que siguen.

Precisión

En el caso estudiado, la precisión se expresa como el percentil 95 de los errores de navegación, tanto horizontal como vertical. Como ya se ha visto anteriormente, el error exigido en operaciones LPV-200, equivalente a aproximación de precisión de categoría I, es, en el caso horizontal, de menos de 16 metros y, en el vertical, de entre 6 y 4 metros.

Para analizar los resultados alcanzados, se escoge el valor más alto de los obtenidos en todas las estaciones RIMS, ya que no existe una estación establecida en Teruel. La Tabla 2.4 recoge dichos resultados.

	Nov. 17	Dic. 17	Ene. 18	Feb. 18	Mar. 18	Abr. 18
HNSE [m]	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2
VNSE [m]	2.0	1.9	2.0	2.4	2.5	2.3

Tabla 2.4: Resultados de precisión para la campaña de toma de datos a largo plazo

Como se puede observar, los errores de posición se encuentran por debajo de los límites establecidos, por lo que se cumplen los requisitos de precisión.

Integridad

En cuanto a la integridad, es necesario analizar los índices de seguridad, tanto en vertical como en horizontal, para estudiar si se cumplen los requisitos establecidos. El valor que no debe sobrepasar es de 1. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 2.5.

	Nov. 17	Dic. 17	Ene. 18	Feb. 18	Mar. 18	Abr. 18
HSI [-]	0.25	0.29	0.22	0.30	0.26	0.27
VSI [-]	0.32	0.31	0.33	0.35	0.32	0.32

Tabla 2.5: Resultados de integridad para la campaña de toma de datos a largo plazo

Se puede observar que en ninguno de los casos se sobrepasa el valor de 1, con lo que se cumplen los requisitos de integridad respecto al índice de seguridad.

Continuidad

Para analizar la continuidad del sistema, se estudia el cociente entre el número de eventos de continuidad en un tiempo de 15 segundos, es decir, los fallos de continuidad, y el número de muestras totales.

Los resultados obtenidos para los satélites operativos, que son el 120 y el 126, se muestran en la Tabla 2.6.

	Nov. 17	Dic. 17	Ene. 18	Feb. 18	Mar. 18	Abr. 18
Continuidad 1/15 [1/s]	<1E-5	<1E-5	<1E-4	<1E-4	<1E-4	<1E-4

Tabla 2.6: Resultados de continuidad para la campaña de toma de datos a largo plazo

En el caso de la continuidad, debe encontrarse entre 1 y 8×10^{-6} . Como se puede observar, los resultados no cumplen los requisitos establecidos. No obstante, sería posible su uso para navegación aérea siempre que se mitigue dicho fallo en condiciones que lo permitan.

Disponibilidad

Finalmente, queda por analizar la disponibilidad del sistema LPV-200. Existen dos maneras diferentes para hacerlo: como porcentaje de tiempo en el que la señal en el espacio (SIS: *Signal in Space*) está disponible, o respecto del tiempo total.

Los resultados obtenidos para los satélites activos con PRN 120 y 123 son los de la Tabla 2.7.

	Nov. 17	Dic. 17	Ene. 18	Feb. 18	Mar. 18	Abr. 18
PRN 120 y 123 [%]	99.90	99.97	99.89	99.98	99.89	99.84
PRN 120 o 123 [%]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PRN 120 [%]	99.90	99.97	99.89	99.98	99.95	99.94
PRN 123 [%]	99.99	99.99	99.99	99.99	99.94	99.90

Tabla 2.7: Resultados de disponibilidad para la campaña de toma de datos a largo plazo

Es fácilmente observable que se cumplen los requisitos de disponibilidad establecidos por la OACI, habiendo disponible siempre uno de los dos satélites.

La segunda manera de medir la disponibilidad del sistema es tomando el porcentaje de tiempo en el que la señal cumple los requisitos para operaciones LPV-200, es decir, que los niveles de protección horizontal y vertical sean los establecidos. Se recogen los resultados en la Tabla 2.8

	Nov. 17	Dic. 17	Ene. 18	Feb. 18	Mar. 18	Abr. 18
HPL <40 m	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %
VPL 10-35 m	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %	>99.9 %

Tabla 2.8: Resultados de disponibilidad para la campaña de toma de datos a largo plazo

Se observa, nuevamente, que se cumplen los requisitos de disponibilidad establecidos.

2.8.2. Campaña sobre el terreno

Tras la realización de los análisis para los cinco días de campaña sobre el terreno y con las gráficas obtenidas, se procede al análisis de los mismos. En esta etapa, se describirán los rendimientos obtenidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad ya mencionados y explicados anteriormente. Además, se comparará con los valores establecidos por la OACI para los procedimientos de aproximación con guiado vertical LPV-200.

Precisión

En este primer apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación para la precisión. Se analiza día a día, comenzando el 1 de Mayo de 2018 y finalizando el 5 del mismo mes. Dichos resultados dan el valor del HNSE y del VNSE. A continuación, aparecen los resultados obtenidos por días. Para tenerlo en cuenta a lo largo del análisis, se debe saber que el HNSE debe ser inferior a 16 m y el VNSE, encontrarse entre 4 y 6 m.

- Día 1 de mayo de 2018

Los resultados mostrados en la Imagen 2.32 se corresponden con el día 121 del calendario GPS.

<pre> <name>HNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85737</samples> <mean>1.02784</mean> <rms>1.06425</rms> </pre>	<pre> <name>VNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85737</samples> <mean>0.411365</mean> <rms>0.556707</rms> </pre>
---	---

(a) HNSE 1 de mayo

(b) VNSE 1 de mayo

Figura 2.32: Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 1 de mayo

- Día 2 de mayo de 2018

Los resultados mostrados en la Imagen 2.33 se corresponden con el día 122 del calendario GPS.

<pre> <name>HNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85735</samples> <mean>0.996703</mean> <rms>1.0269</rms> </pre>	<pre> <name>VNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85735</samples> <mean>0.458283</mean> <rms>0.582381</rms> </pre>
---	---

(a) HNSE 2 de mayo

(b) VNSE 2 de mayo

Figura 2.33: Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 2 de mayo

- Día 3 de mayo de 2018

Los resultados mostrados en la Imagen 2.34 se corresponden con el día 123 del calendario GPS.

<pre> <name>HNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>86039</samples> <mean>0.960485</mean> <rms>0.993628</rms> </pre>	<pre> <name>VNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>86039</samples> <mean>0.456056</mean> <rms>0.594322</rms> </pre>
---	---

(a) HNSE 3 de mayo

(b) VNSE 3 de mayo

Figura 2.34: Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 3 de mayo

- Día 4 de mayo de 2018

Los resultados mostrados en la Imagen 2.35 se corresponden con el día 124 del calendario GPS.

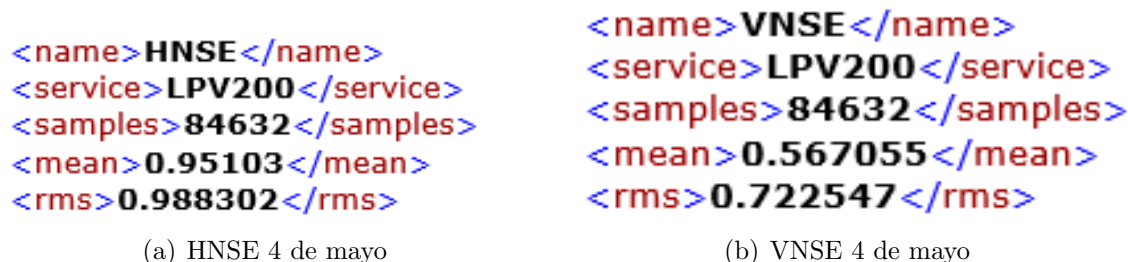


Figura 2.35: Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 4 de mayo

- Día 5 de mayo de 2018

Los resultados mostrados en la Imagen 2.36 se corresponden con el día 125 del calendario GPS.

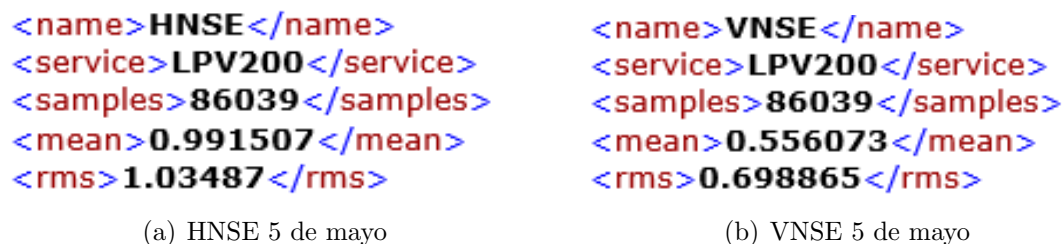


Figura 2.36: Errores LPV-200 del Sistema de Navegación para el 5 de mayo

Se adjunta a modo de resumen la Tabla 2.9.

	1 de mayo	2 de mayo	3 de mayo	4 de mayo	5 de mayo
HNSE [m]	1.027840	0.996703	0.960485	0.95103	0.991507
VNSE [m]	0.411365	0.458283	0.456056	0.567055	0.556073

Tabla 2.9: Resumen de los resultados de precisión para la campaña de toma de datos sobre el terreno

Como se puede observar, tanto en la tabla como en las imágenes mostradas en la presente sección, el HNSE presenta un valor en torno a 1 m, muy inferior a los 16 m de máxima. Por otro lado, el VNSE oscila alrededor de 0.5 m, también por debajo de los requisitos de la operación LPV-200 (4 a 6 m).

Cabe destacar que el error horizontal no suele ser mayor al vertical, pese a que lo observado en los resultados arroja este hecho.

Integridad

Los resultados de integridad para los 5 días de estudio se recogen en una serie de archivos de extensión .emf file. Para abrir dichos archivos, es necesario recurrir al programa Paint.

Los archivos contienen una serie de histogramas, tanto para el HSI (*Horizontal Safety Index*) como para el VSI (*Vertical Safety Index*). También se muestran los archivos correspondientes al HPE (*Horizontal Position Error*) y el VPE (*Vertical Position Error*). Finalmente, se recogen los diagramas de Stanford de integridad. Cabe destacar que los histogramas relacionados con el HSI y VSI se encuentran en la carpeta *mfiles* incluida, a su vez, en la carpeta *software* de PEGASUS.

Para cumplir el requisito de integridad, es necesario que los índices de seguridad se encuentren por debajo de 1. En caso de no ser así, uede darse una situación de información engañosa.

- Día 1 de mayo de 2018

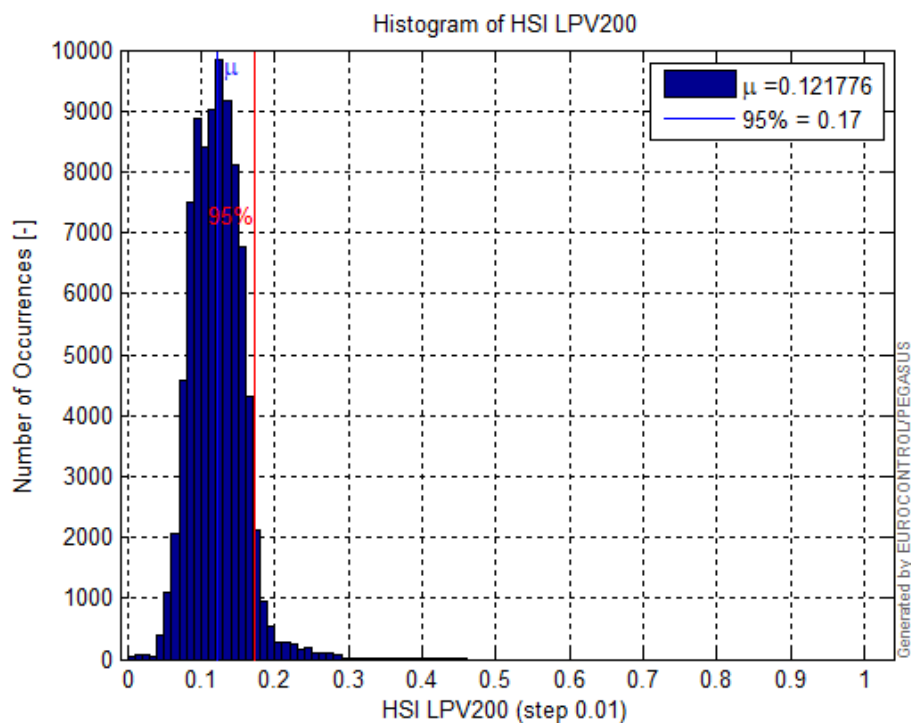


Figura 2.37: Resultado HSI para el día 1 de mayo de 2018

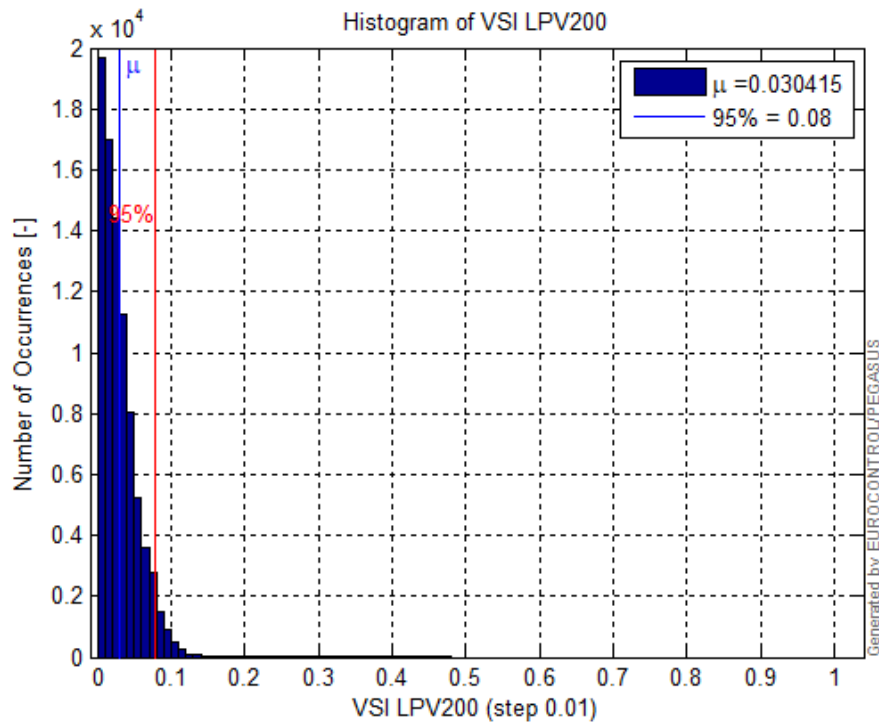


Figura 2.38: Resultado VSI para el día 1 de mayo de 2018

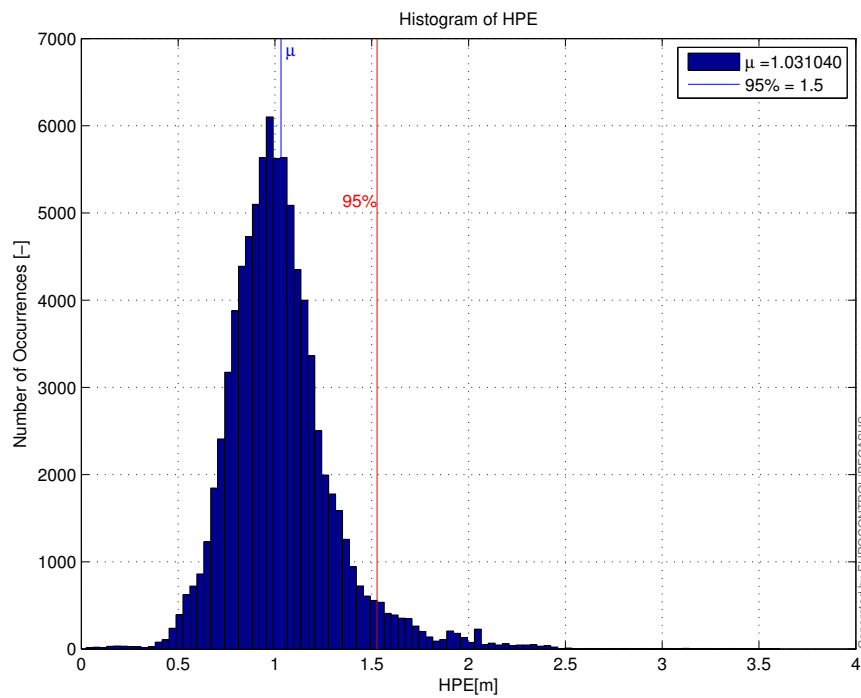


Figura 2.39: Resultado HPE para el día 1 de mayo de 2018

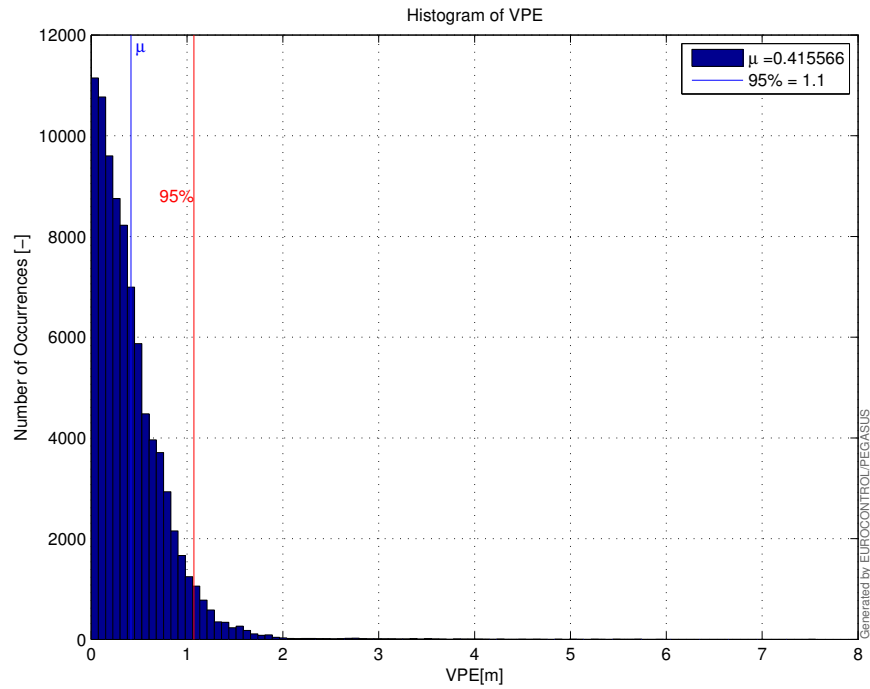


Figura 2.40: Resultado VPE para el día 1 de mayo de 2018

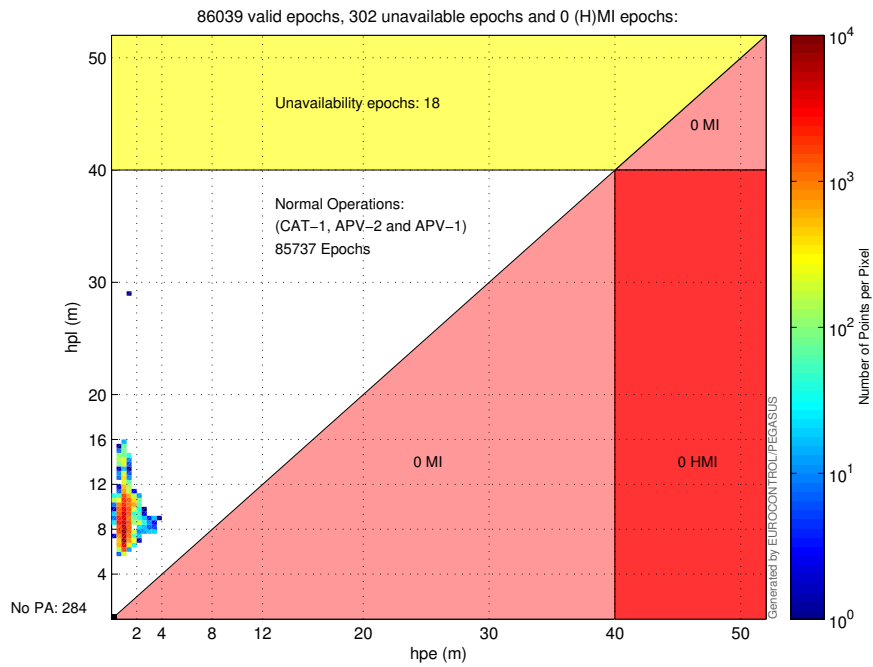


Figura 2.41: Diagrama de Stanford horizontal para el día 1 de mayo de 2018

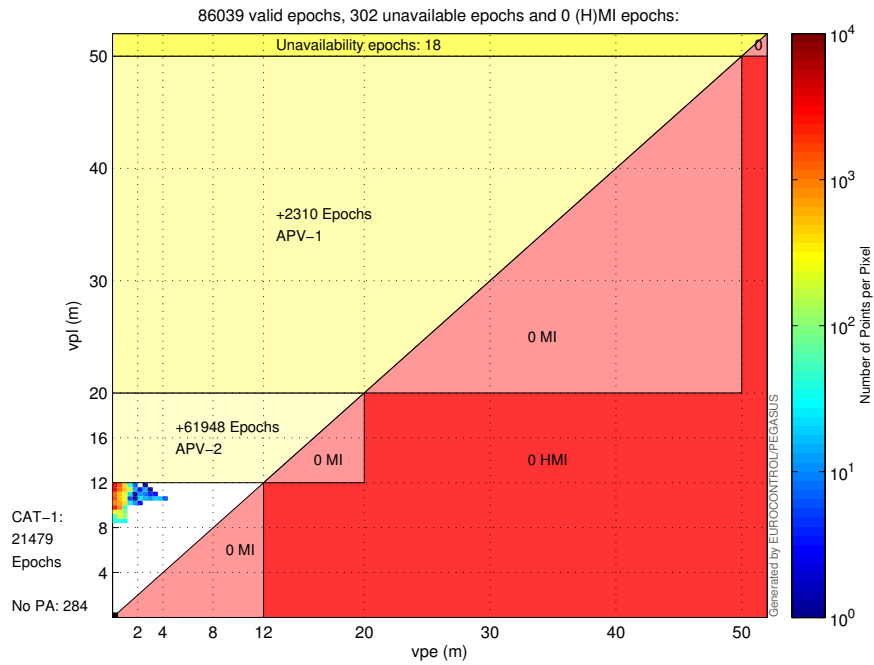


Figura 2.42: Diagrama de Stanford Vertical para el día 1 de mayo de 2018

- Día 2 de mayo de 2018

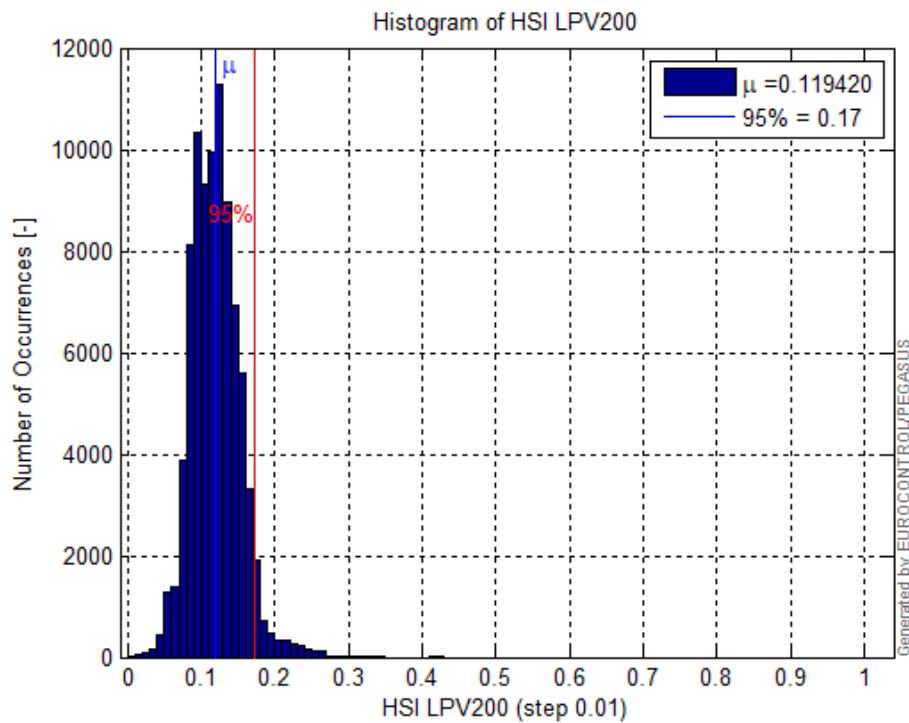


Figura 2.43: Resultado HSI para el día 2 de mayo de 2018

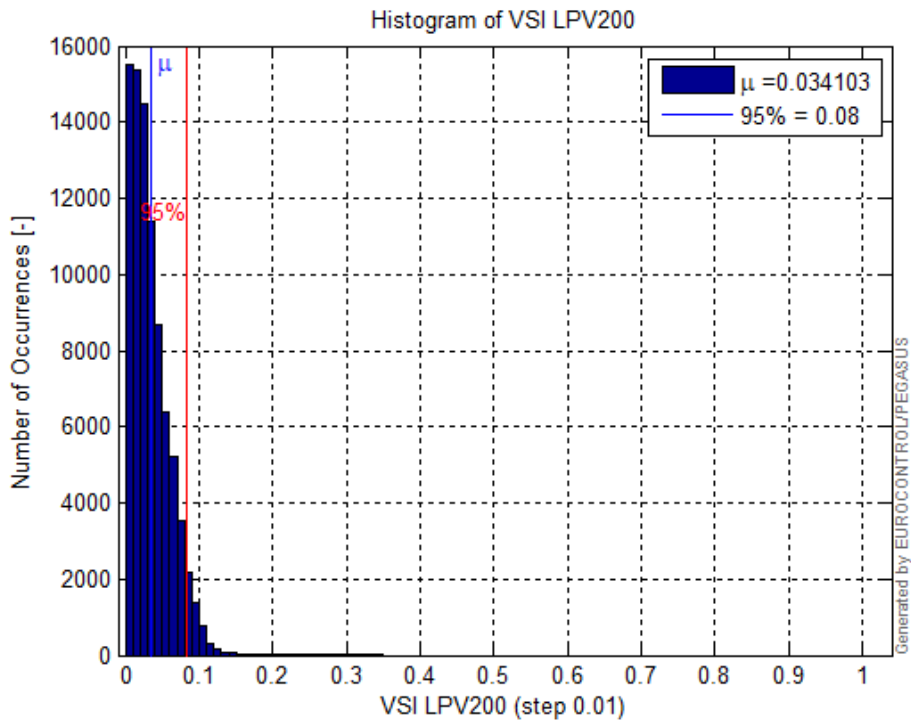


Figura 2.44: Resultado VSI para el día 2 de mayo de 2018

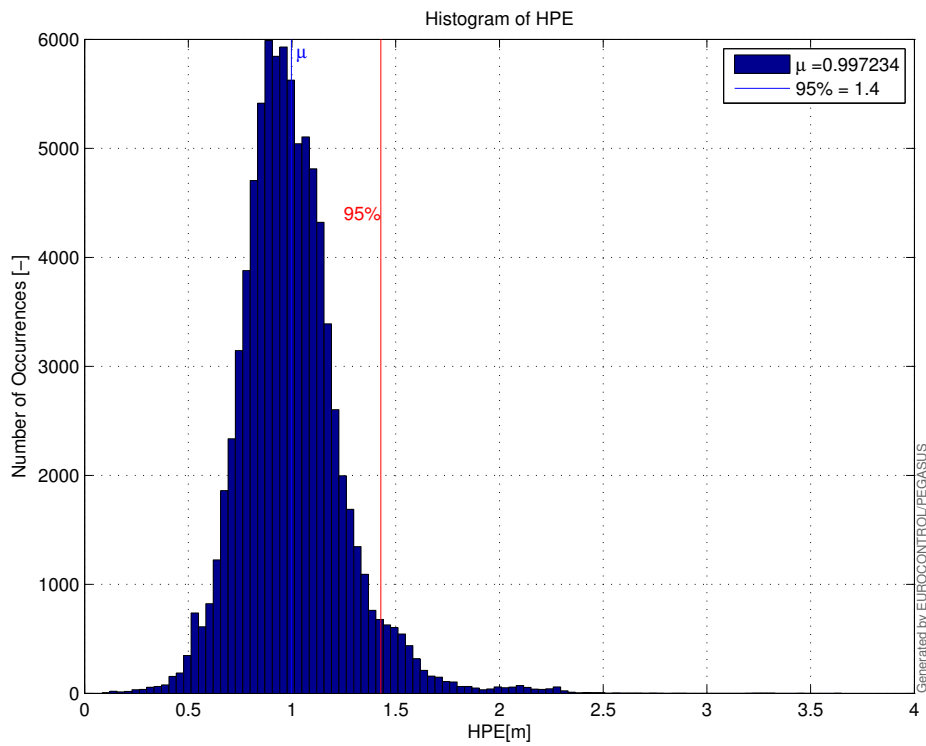


Figura 2.45: Resultado HPE para el día 2 de mayo de 2018

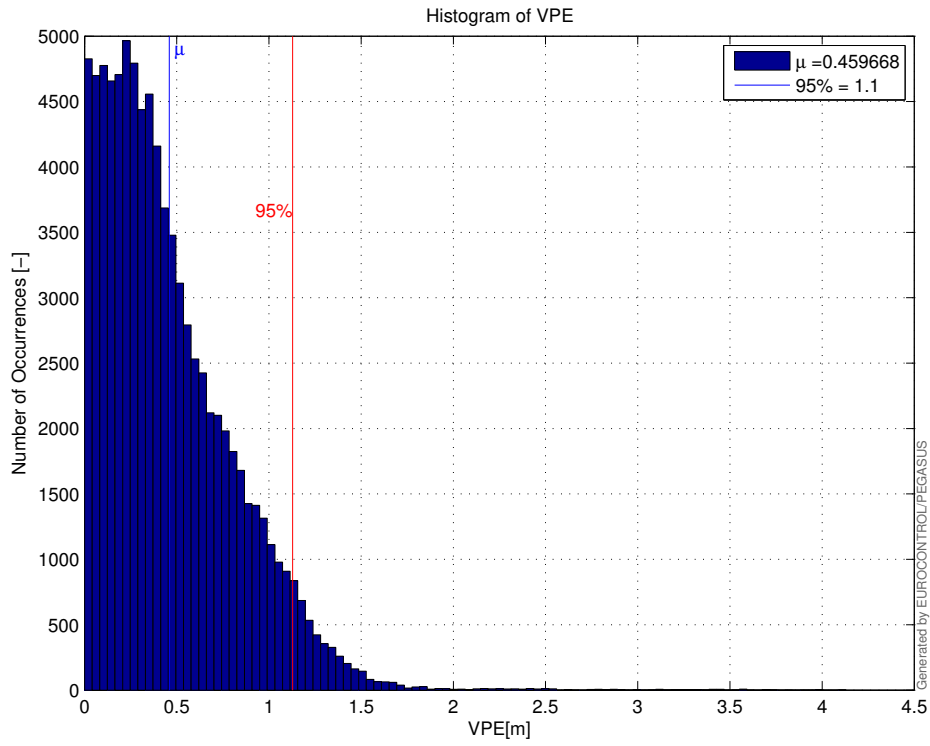


Figura 2.46: Resultado VPE para el día 2 de mayo de 2018

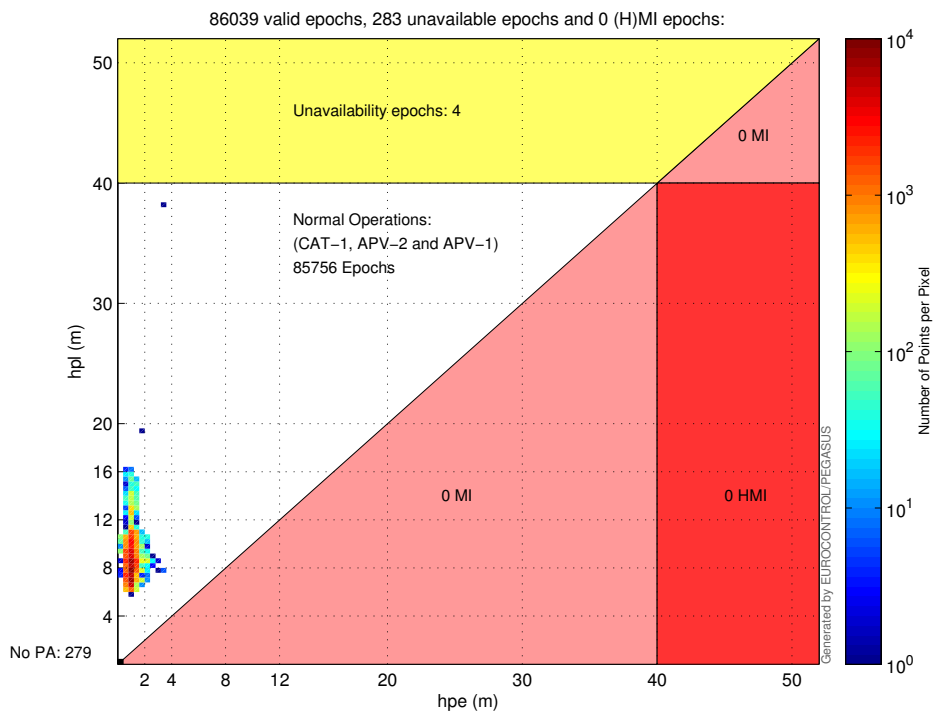


Figura 2.47: Diagrama de Stanford horizontal para el día 2 de mayo de 2018

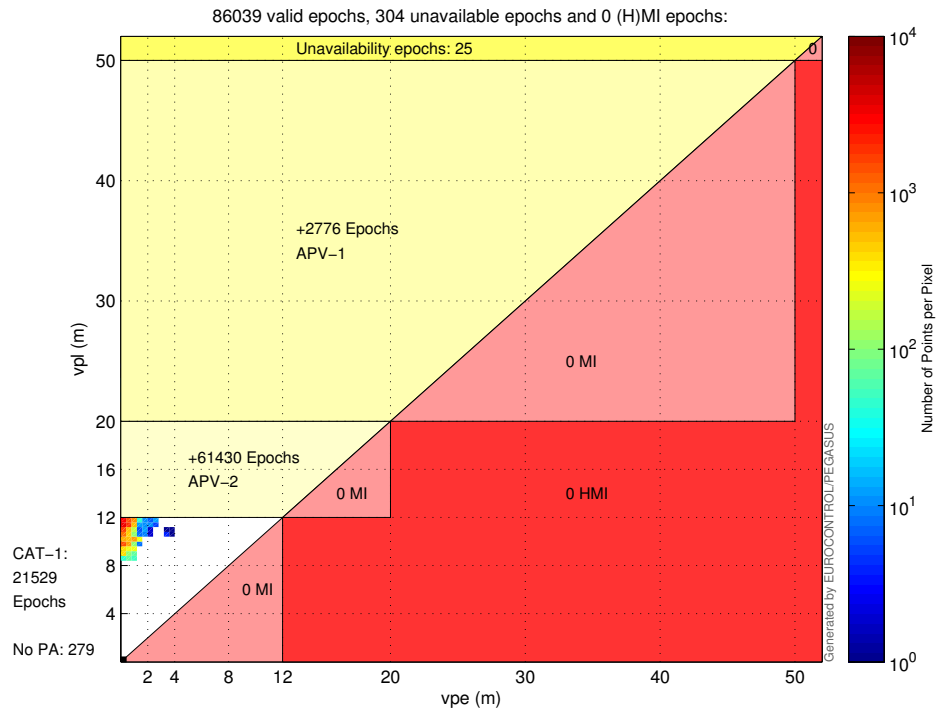


Figura 2.48: Diagrama de Stanford Vertical para el día 2 de mayo de 2018

- Día 3 de mayo de 2018

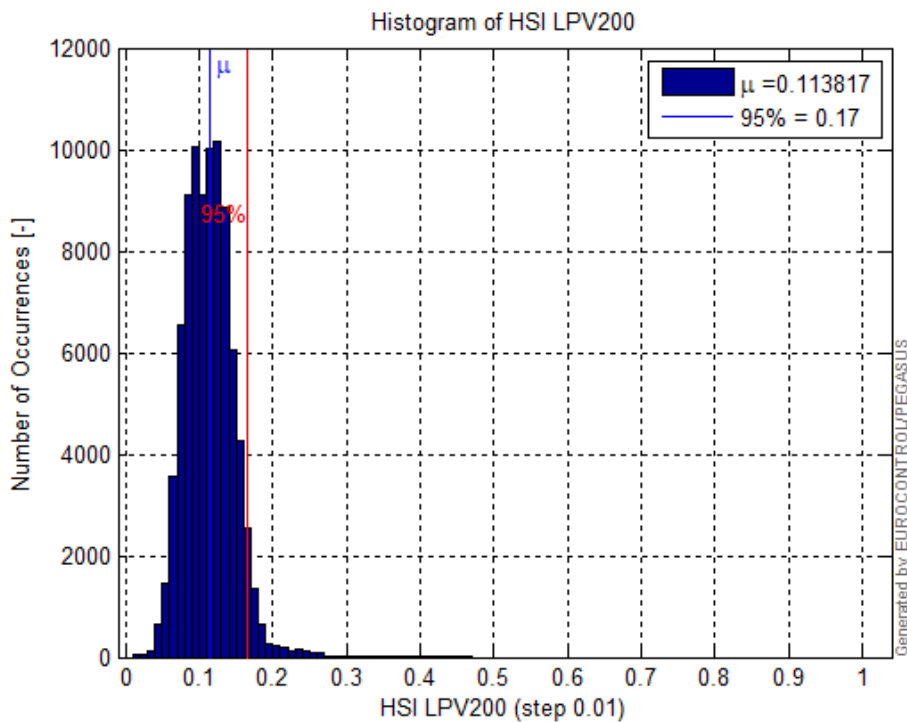


Figura 2.49: Resultado HSI para el día 3 de mayo de 2018

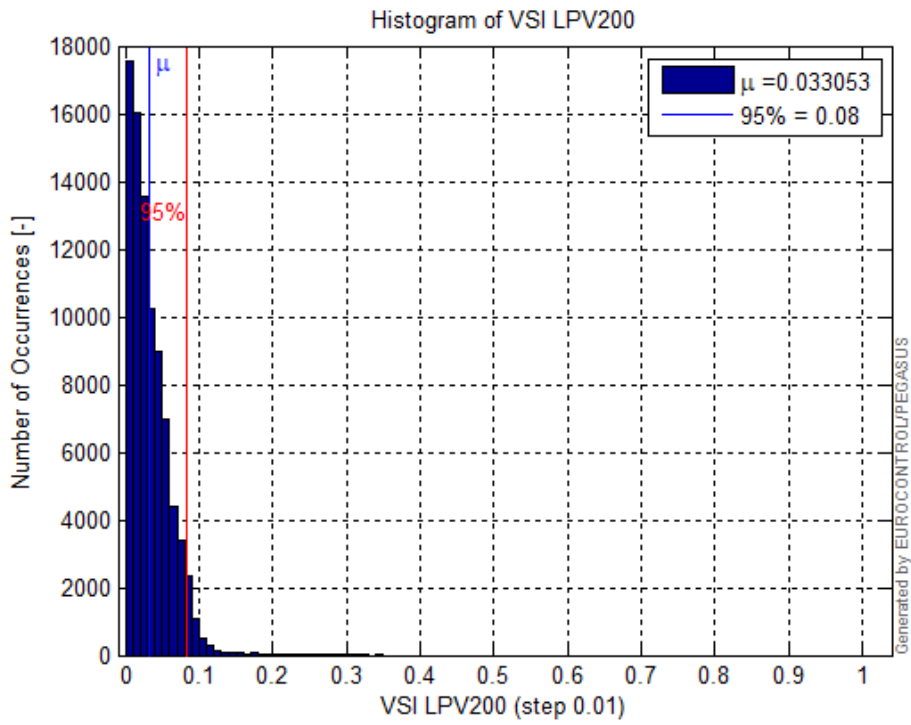


Figura 2.50: Resultado VSI para el día 3 de mayo de 2018

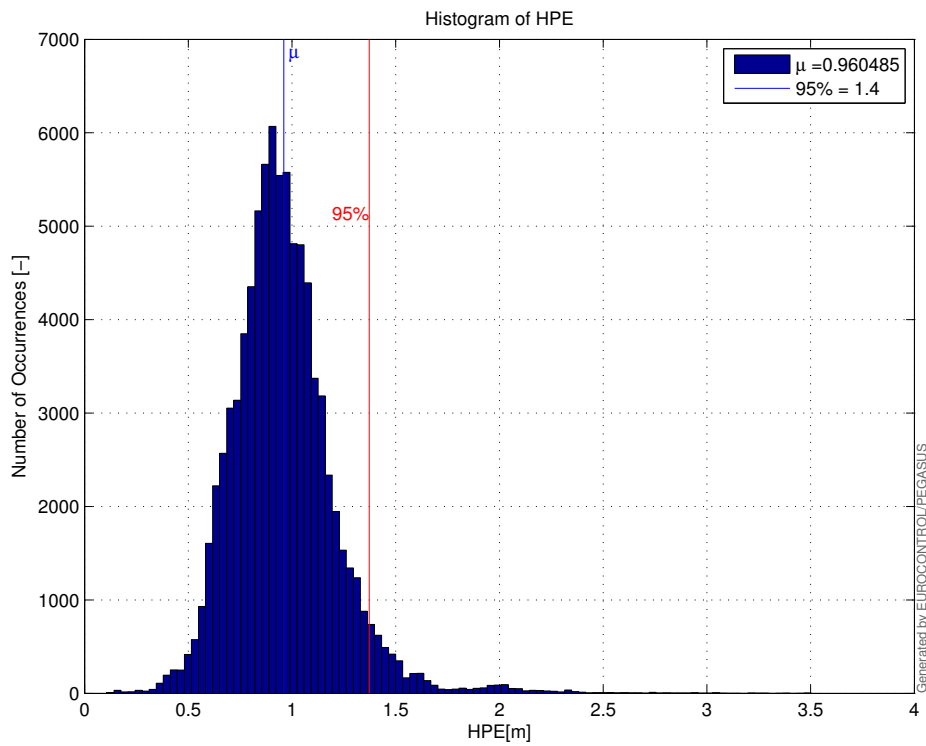


Figura 2.51: Resultado HPE para el día 3 de mayo de 2018

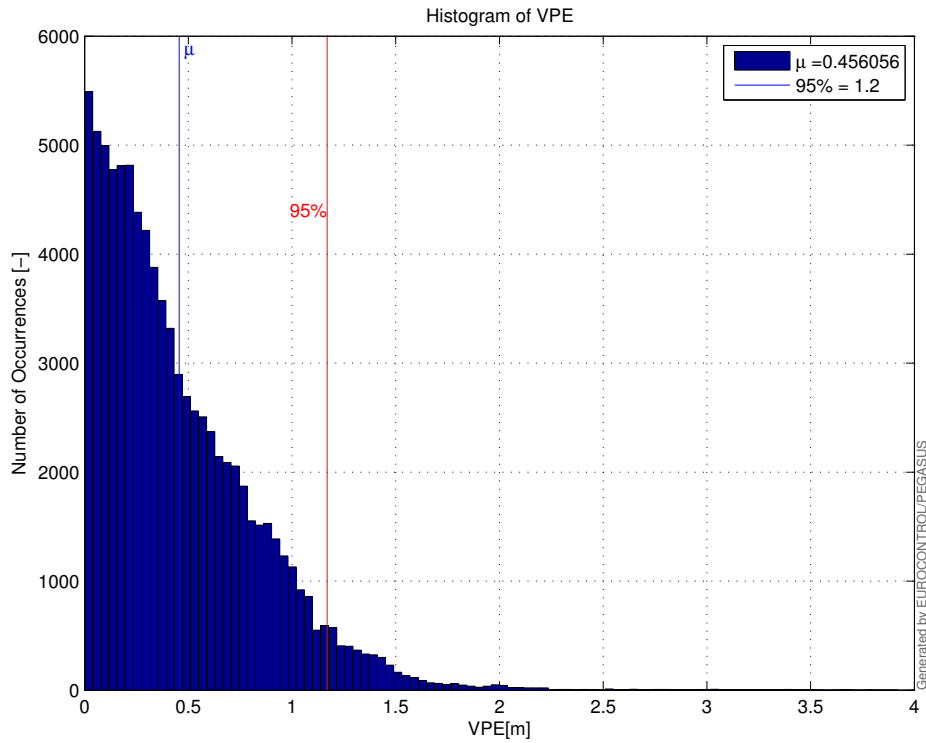


Figura 2.52: Resultado VPE para el día 3 de mayo de 2018

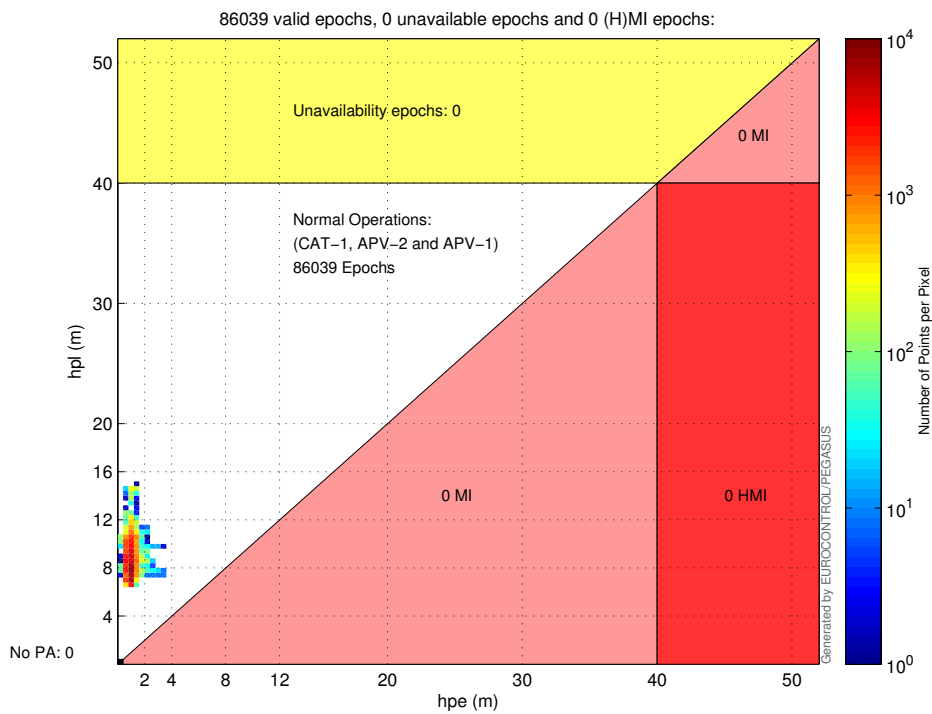


Figura 2.53: Diagrama de Stanford horizontal para el día 3 de mayo de 2018

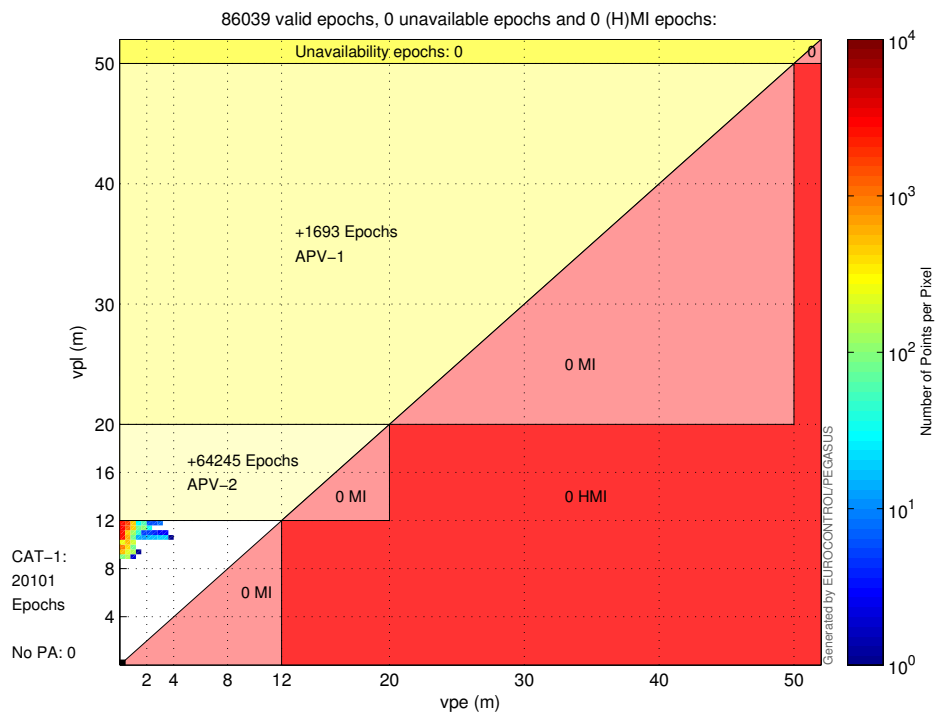


Figura 2.54: Diagrama de Stanford Vertical para el día 3 de mayo de 2018

- Día 4 de mayo de 2018

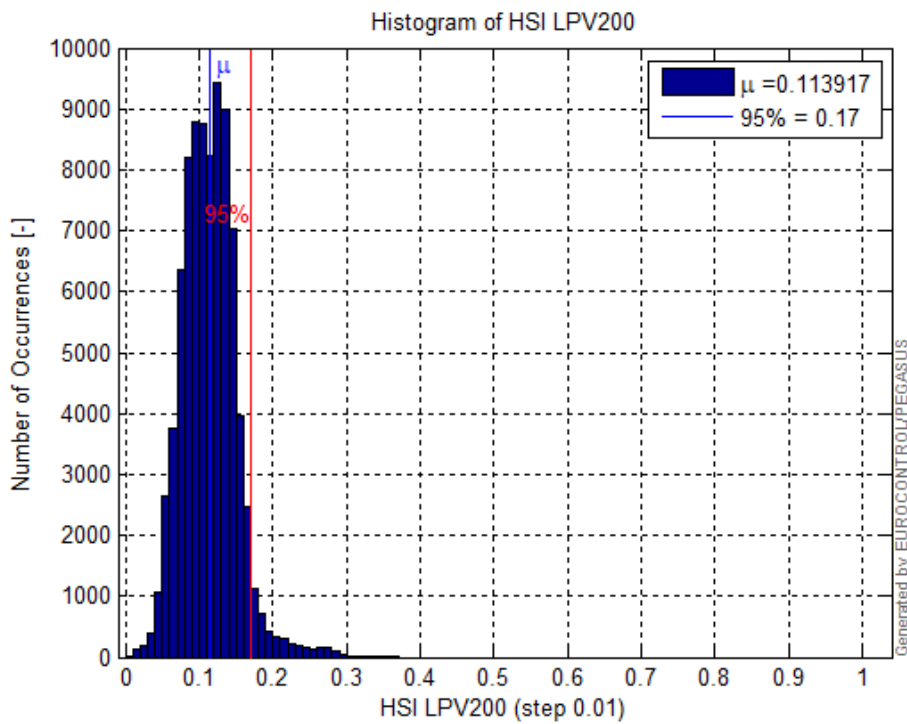


Figura 2.55: Resultado HSI para el día 4 de mayo de 2018

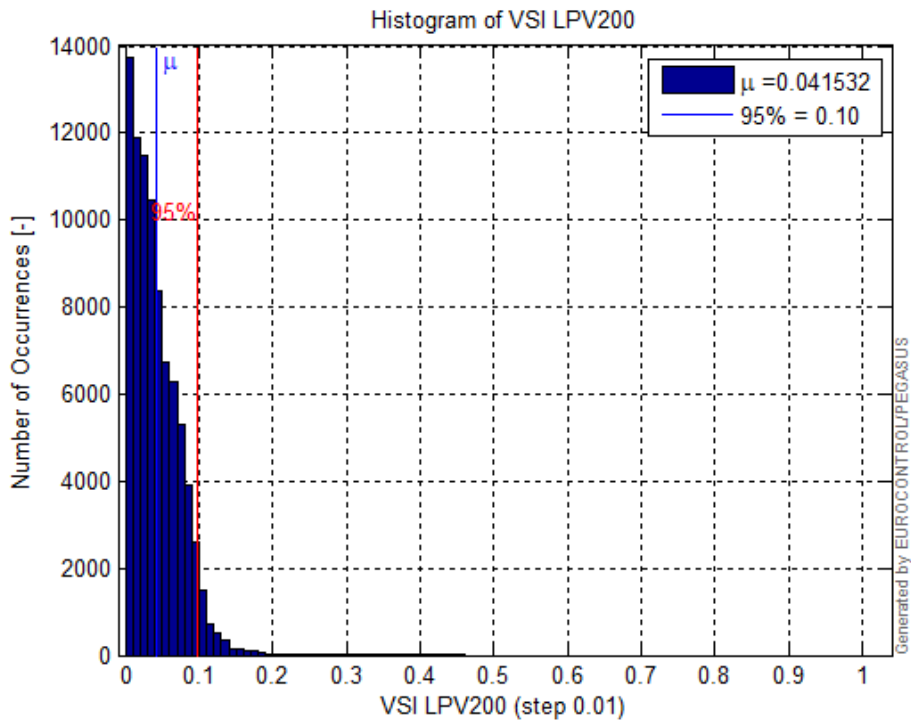


Figura 2.56: Resultado VSI para el día 4 de mayo de 2018

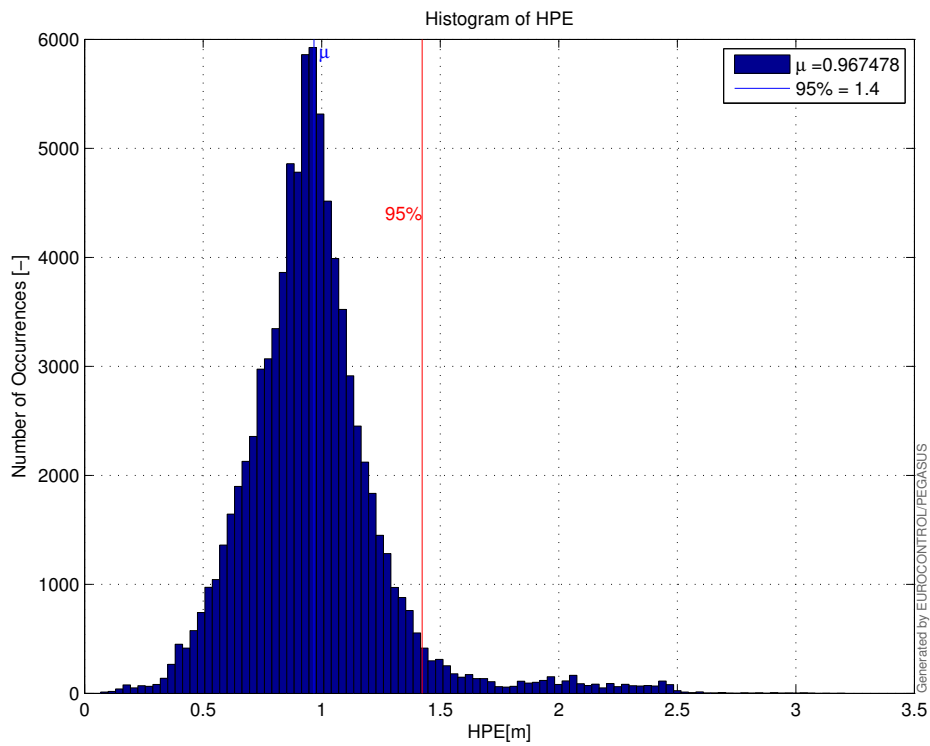


Figura 2.57: Resultado HPE para el día 4 de mayo de 2018

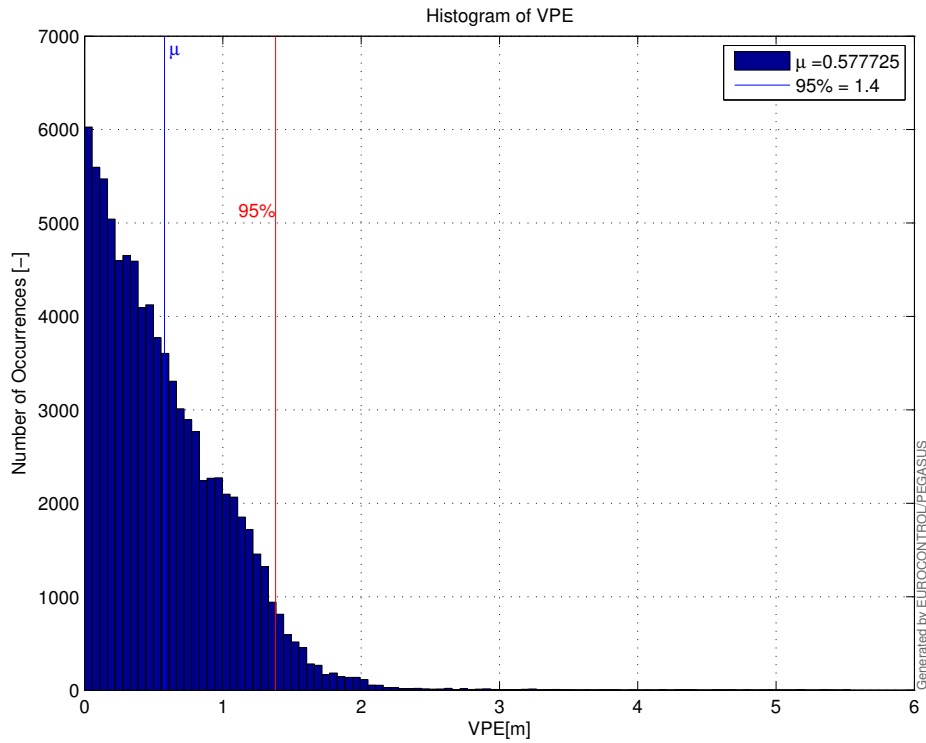


Figura 2.58: Resultado VPE para el día 4 de mayo de 2018

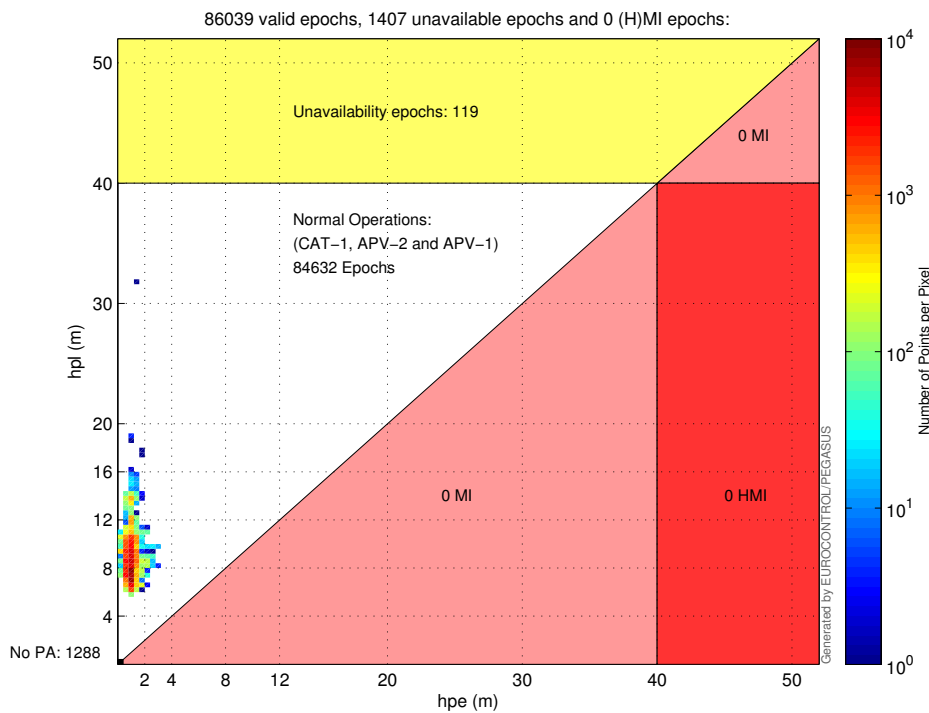


Figura 2.59: Diagrama de Stanford horizontal para el día 4 de mayo de 2018

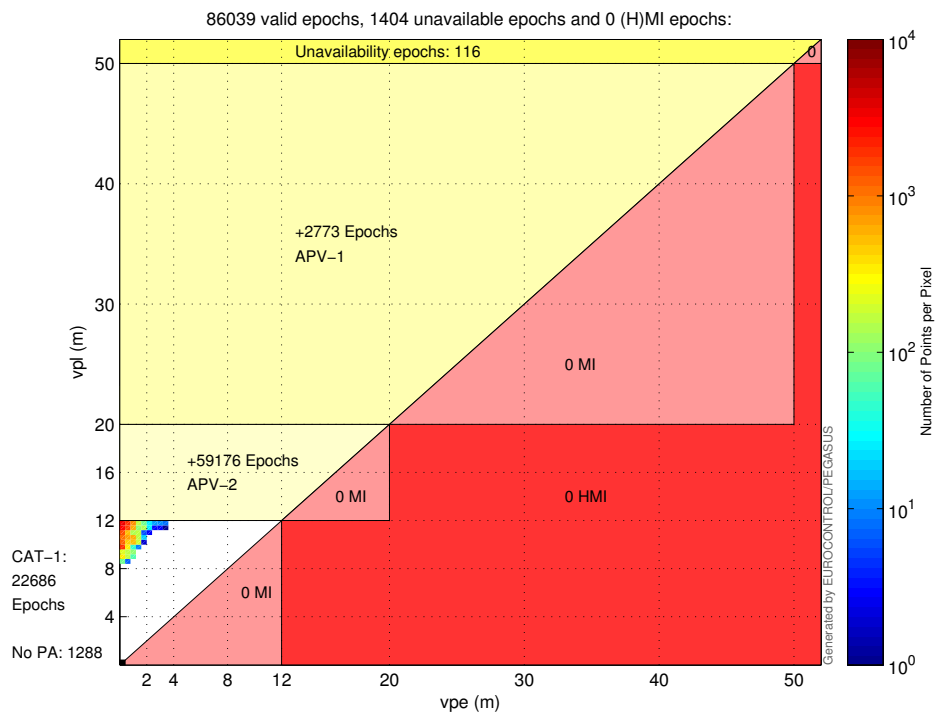


Figura 2.60: Diagrama de Stanford Vertical para el día 4 de mayo de 2018

- Día 5 de mayo de 2018

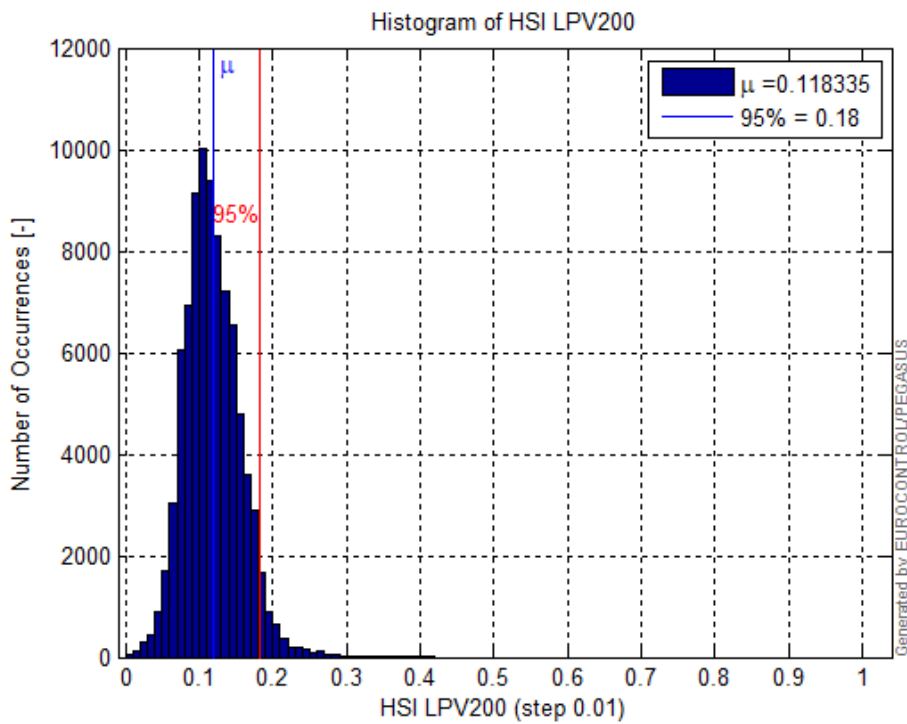


Figura 2.61: Resultado HSI para el día 5 de mayo de 2018

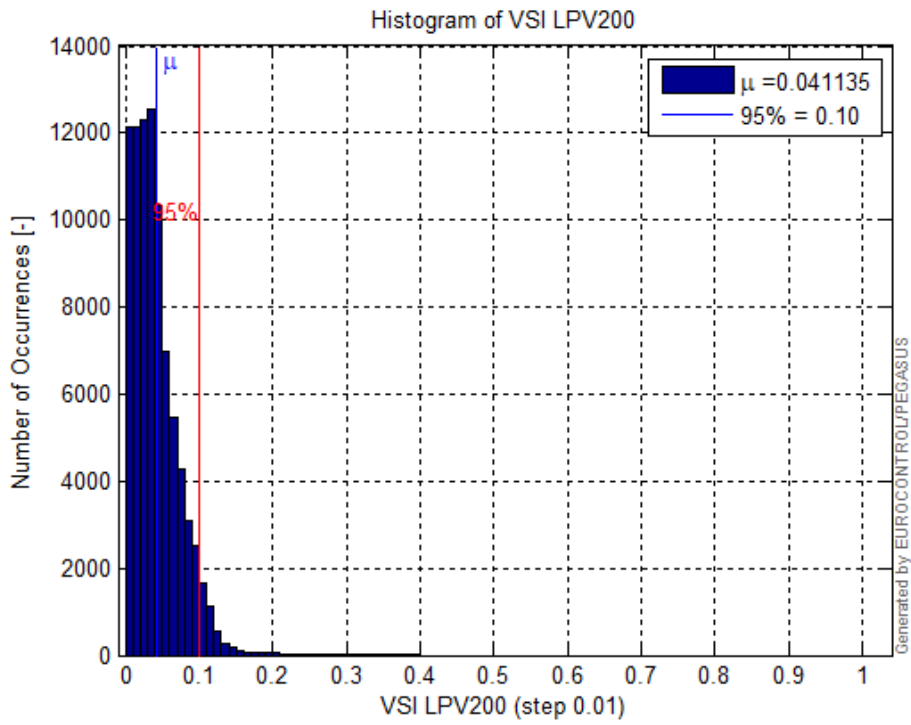


Figura 2.62: Resultado VSI para el día 5 de mayo de 2018

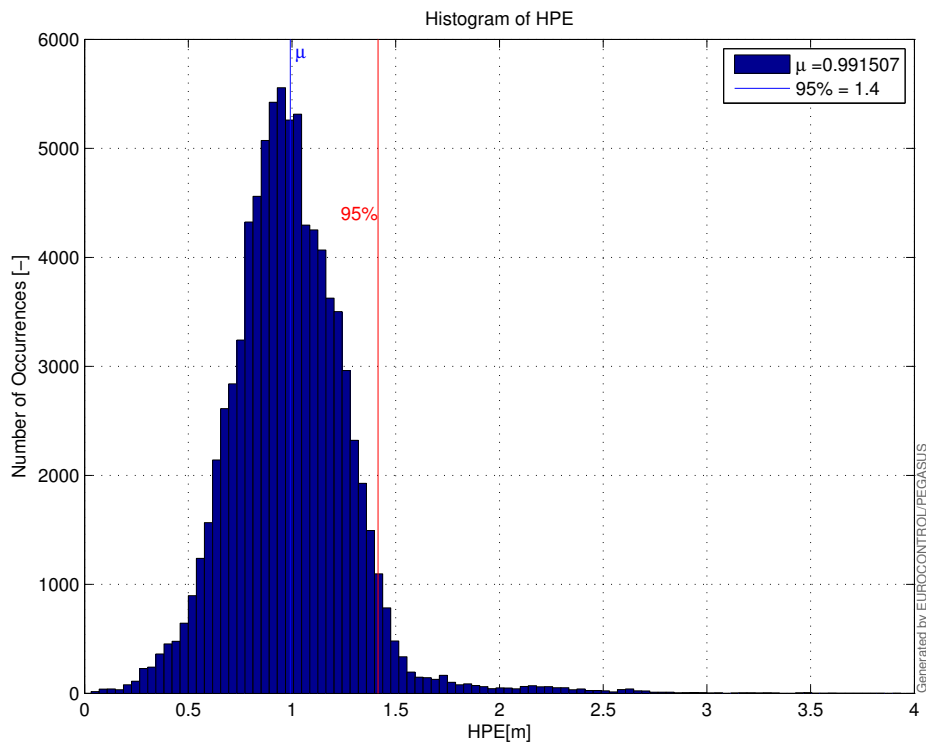


Figura 2.63: Resultado HPE para el día 5 de mayo de 2018

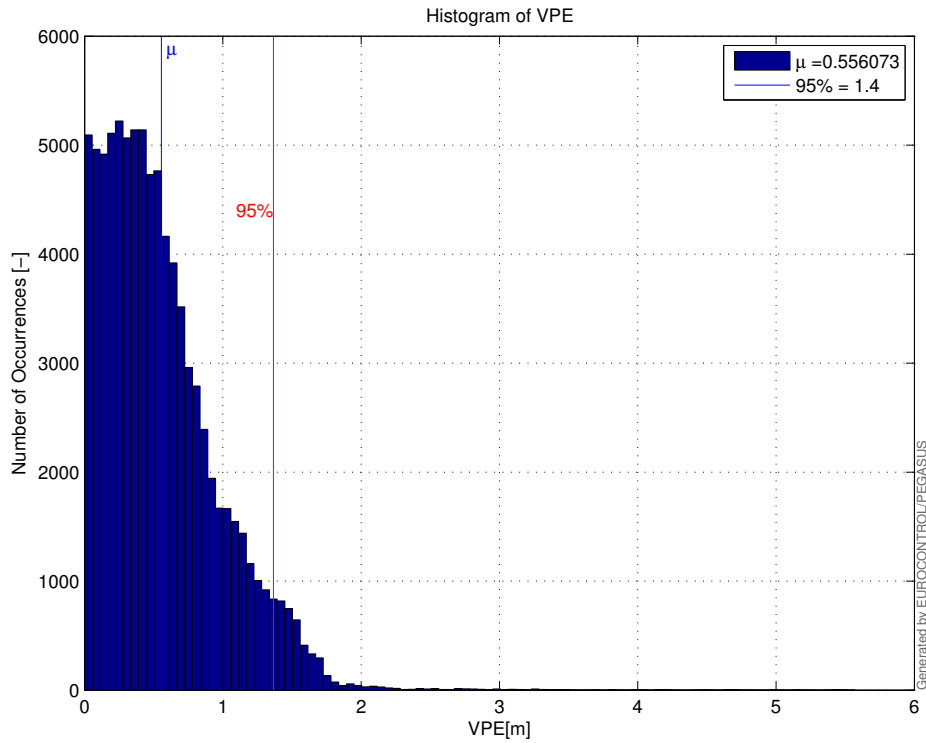


Figura 2.64: Resultado VPE para el día 5 de mayo de 2018

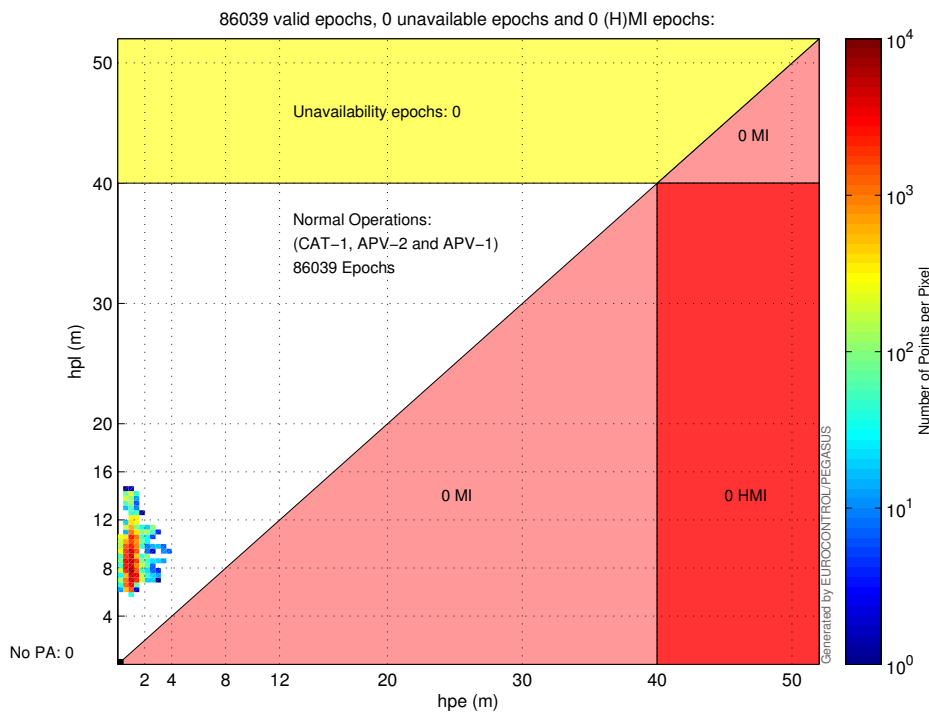


Figura 2.65: Diagrama de Stanford horizontal para el día 5 de mayo de 2018

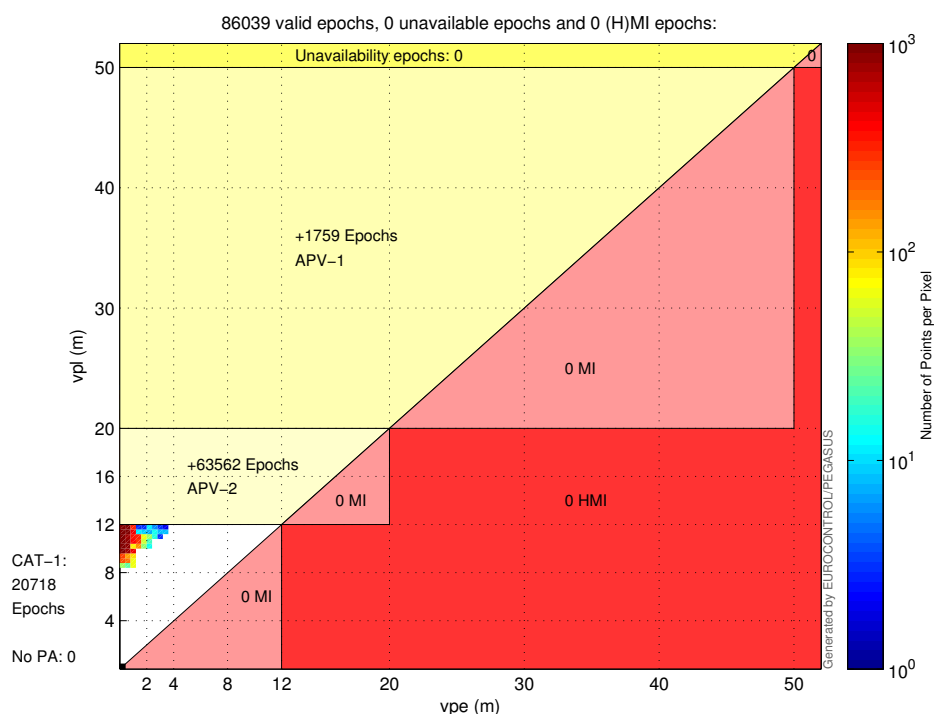


Figura 2.66: Diagrama de Stanford Vertical para el día 5 de mayo de 2018

En la Tabla 2.10 se recoge el resumen de los resultados de integridad para los 5 días de campaña sobre el terreno.

	1 de mayo	2 de mayo	3 de mayo	4 de mayo	5 de mayo
HSI [-]	0.1217760	0.1194200	0.1138170	0.1139170	0.1183350
VSI [-]	0.0304153	0.0341030	0.0330529	0.0415320	0.0411347

Tabla 2.10: Resumen de los resultados de integridad para la campaña de toma de datos sobre el terreno

Se puede observar que, en todos los casos, los índices vertical y horizontal se encuentran por debajo de la unidad. Así, se cumplen los requisitos de integridad para el caso de estudio.

Continuidad

La continuidad de EGNOS se mide a través de un evento de continuidad única, es decir, un fallo de continuidad.

Para hallar los resultados de la campaña de 5 días, es necesario hacer uso del módulo XPL Estimation de PEGASUS, la extensión de cuyos ficheros generados es .stat. Estos archivos se abren mediante Excel.

La Tabla 2.11, muestra los resultados obtenidos para la continuidad.

	1 de mayo	2 de mayo	3 de mayo	4 de mayo	5 de mayo
Continuidad LPV-200	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Tabla 2.11: Resultados de continuidad para la campaña de toma de datos sobre el terreno

Se puede observar que no existen, aparentemente, eventos de discontinuidad en el funcionamiento del servicio. No obstante, no se puede afirmar, a partir de los resultados obtenidos, que el servicio presente los valores de continuidad requeridos para su operación. A pesar de ello, sí es posible su uso para la navegación si se mitiga el fallo en condiciones que lo permitan.

Disponibilidad

Los resultados relativos a la disponibilidad de EGNOS a lo largo de los 5 días de estudio, se recogen en el presente apartado. Para hallarlos, ha sido necesario recurrir al módulo x de PEGASUS.

Refrescando lo ya explicado anteriormente, la disponibilidad EGNOS para una operación del tipo LPV-200 se define como el porcentaje de épocas en las que los niveles de protección (*Protection Level*) están por debajo de los límites de alerta (*Alert Limit*) durante un período. Para el caso del servicio LPV-200, el nivel de protección horizontal debe ser inferior a 40 m y el vertical, a 35 m.

En las Tablas 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16 se recogen los resultados de disponibilidad en forma de porcentaje. Dicho valor hace referencia a las épocas en las que la señal (SIS: *Signal In Space*) estuvo disponible.

- Día 1 de mayo de 2018

Se recogen los datos de disponibilidad para el día 121 GPS.

Satélite PRN 120	Valid LPV200	85901
	Disponibilidad [%]	99.424755
Satélite PRN 123	Valid LPV200	86302
	Disponibilidad [%]	99.888886

Tabla 2.12: Resultados de disponibilidad para el día 1 de mayo de 2018

- Día 2 de mayo de 2018

Se recogen los datos de disponibilidad para el día 122 GPS.

Satélite PRN 120	Valid LPV200	85946
	Disponibilidad [%]	99.47684
Satélite PRN 123	Valid LPV200	86246
	Disponibilidad [%]	99.82407

Tabla 2.13: Resultados de disponibilidad para el día 2 de mayo de 2018

- Día 3 de mayo de 2018

Se recogen los datos de disponibilidad para el día 123 GPS.

Satélite PRN 120	Valid LPV200	86218
	Disponibilidad [%]	99.791662
Satélite PRN 123	Valid LPV200	84314
	Disponibilidad [%]	97.587907

Tabla 2.14: Resultados de disponibilidad para el día 3 de mayo de 2018

- Día 4 de mayo de 2018

Se recogen los datos de disponibilidad para el día 124 GPS.

Satélite PRN 120	Valid LPV200	84831
	Disponibilidad [%]	98.186301
Satélite PRN 123	Valid LPV200	85138
	Disponibilidad	98.541633

Tabla 2.15: Resultados de disponibilidad para el día 4 de mayo de 2018

- Día 5 de mayo de 2018

Se recogen los datos de disponibilidad para el día 125 GPS.

Satélite PRN 120	Valid LPV200	86290
	Disponibilidad [%]	99.874997
Satélite PRN 123	Valid LPV200	86208
	Disponibilidad [%]	99.780088

Tabla 2.16: Resultados de disponibilidad para el día 5 de mayo de 2018

A modo de resumen se muestra la Tabla 2.17.

Disponibilidad [%]	1 de mayo	2 de mayo	3 de mayo	4 de mayo	5 de mayo
PRN 120	99.42	99.48	99.80	98.19	99.87
PRN 123	99.89	99.82	97.59	98.54	99.78

Tabla 2.17: Resumen de los datos de disponibilidad para la campaña de datos sobre el terreno

Tal y como se puede observar en los resultados obtenidos, los requisitos de disponibilidad para LPV-200 en los 5 días de análisis se cumplen. Esto se ve en el hecho de que los valores estén comprendidos entre 99% y 99.999% en la mayoría de los casos para los satélites de EGNOS, a excepción del satélite PRN 120 el día 4 de mayo y el satélite PRN 123 los días 3 y 4 de mayo. No obstante, los valores no se alejan, escandalosamente, del 99%, por lo que se puede considerar válido el sistema.

2.9. Conclusiones

En la realización de esta segunda parte del proyecto se ha comenzado por analizar los datos de EGNOS para la campaña de toma de datos a largo plazo. Los resultados obtenidos a través del ESSP, concretamente del *Monthly Performance Report*, han desvelado que, en este primer análisis mensual, el sistema es válido y se puede proseguir con las siguientes etapas de la validación.

A continuación, se ha procedido a realizar el análisis de la campaña sobre el terreno. Para ello, ha sido necesario conseguir los archivos RINEX de navegación y observación de la estación de Teruel y trabajar en su concatenación y depuración de datos no deseados. También se han extraído del FTP de EDAS los ficheros SBAS pertinentes. Con los datos ya tratados, se ha procedido a su análisis mediante el *software* de EUROCONTROL, PEGASUS. Los resultados obtenidos en esta segunda etapa han sido satisfactorios. Pese a que el punto débil del servicio LPV-200 ha sido la continuidad, sigue siendo viable la implementación del mismo.

Pese a que la siguiente etapa incluye la toma de datos con un receptor EGNOS en el propio aeropuerto, así como de la toma de datos en el ensayo de vuelo, ambas previstas para su inclusión en el estudio, el tiempo disponible para la realización del Trabajo de Fin de Máster, así como el desarrollo de un vehículo capaz de volar los kilómetros que exige la aproximación inicial, no han permitido su realización. Ésta podría resultar de elevado interés para ser incluida en un futuro trabajo.

De este modo, se puede concluir a partir de los resultados obtenidos que el servicio LPV-200 basado en SBAS es válido, a priori, para su implementación en el aeropuerto de Teruel.

Como cierre de la segunda parte del proyecto, se puede afirmar que, a la luz de los resultados, el aeropuerto de Teruel está listo para ser incluido, en un futuro cercano, en la red de modernización de la navegación aérea. Se prevé que, en los próximos años, entre en la programación de aeropuertos españoles que comenzarán a funcionar con sistemas GNSS y de aumentación.

Capítulo 3

Parte III: Conclusiones Generales, Pliego de Condiciones y Presupuesto

3.1. Conclusiones Generales

La realización del presente proyecto tiene como objetivo el mayor avance posible dentro del proceso de diseño y validación de un nuevo procedimiento para el aeropuerto de Teruel, trabajando con los últimos avances tecnológicos en navegación aérea.

Para alcanzar el objetivo ya mencionado, se ha invertido una gran cantidad de tiempo y esfuerzo, ya que la normativa a seguir para cada una de las partes es extensa. A esto, se deben sumar las complicaciones que suelen aparecer a la hora de iniciar algo desde cero.

También cabe mencionar que la finalización completa del proyecto no ha podido realizarse, dado que no se ha dispuesto del tiempo suficiente, así como de los medios necesarios para su consecución.

A lo largo de la primera parte, como ya se ha mencionado, se ha realizado un diseño de la ruta de aproximación a ambas cabeceras de pista para el aeropuerto de Teruel. Dicho diseño no se integra, exclusivamente, del procedimiento, sino también de la protección lateral y vertical de la ruta, junto con otros requerimientos. Para cumplir todos los requisitos asociados, se ha recurrido a una extensa normativa, muy específica y aún en desarrollo, por tratarse de un servicio que se encuentra en evolución a día de hoy.

Se puede concluir que el resultado de la primera parte del proyecto ha resultado exitoso, alcanzándose el objetivo establecido a priori y pudiéndose realizar un diseño coherente y acorde a la normativa.

La segunda parte del proyecto incluye el proceso de validación. Aunque éste se compone de 3 etapas, se han realizado tan solo las 2 primeras debido a la falta de tiempo ya mencionada. Se incluye, también, una introducción teórica para ubicar al lector en el campo de las aplicaciones aeronáuticas de los sistemas GNSS/SBAS.

Para llevar a cabo dicho proceso de validación, ha sido necesario hacer uso del *software* de EUROCONTROL, PEGASUS. A lo largo del desarrollo de esta parte, han surgido problemas que ha sido necesario consultar con la persona experta en el programa que el propio *helpdesk* de EUROCONTROL ha proporcionado.

La primera parte del proceso ha consistido en la campaña de toma de datos a largo plazo, en la que se han analizado los *Monthly Performance Reports* del ESSP. Este análisis arrojó resultados satisfactorios, por lo que se continuó con el proceso.

A continuación, para la campaña sobre el terreno, se recurrió a una serie de archivos obtenidos a través de Internet. Se requiere de una preparación previa de dichos archivos para ser, posteriormente, analizados mediante el ya mencionado *software* PEGASUS. Los resultados obtenidos han corroborado satisfactoriamente, que el sistema es válido y que, por tanto, se podría pasar a la toma de datos en el mismo aeropuerto. A partir de dicho punto, el trabajo queda abierto a futuras investigaciones que continúen con el procedimiento de validación aquí iniciado.

Con los resultados ya sobre el papel, se extrae como primera conclusión la importancia de la modernización del aeropuerto de Teruel, cumpliendo los objetivos planteados para su futuro desarrollo. Los datos extraídos del estudio corroboran el uso de esta tecnología de navegación en un aeródromo que aún no dispone de aproximaciones del tipo instrumental.

Como futuro desarrollo, se propone continuar con las dos líneas principales que han quedado abiertas. Por un lado, resulta de gran interés la conclusión del proceso de validación del servicio en el aeropuerto, que incluye la toma de datos sobre el terreno, así como el ensayo de vuelo. Por otro lado, se propone el refuerzo del proceso de diseño mediante la simulación del vuelo de la aproximación diseñada. Para ello, resulta necesario el uso del *software* específico para este propósito.

3.2. Pliego de Condiciones

3.2.1. Condiciones Generales

General

En cualquier puesto de trabajo en el que, habitualmente y durante una parte relevante del trabajo se haga uso de un equipo con pantalla de visualización, ya bien se trate de un ordenador o vigilancia de pantallas, está sujeto a unos riesgos bien definidos que se deben prevenir. Este tipo de trabajo constituye, probablemente, el ejemplo más característico de cómo una nueva tecnología puede suponer la introducción de nuevos riesgos tales como problemas en ojos y visión, posturales y lesiones por movimientos repetidos y estrés.

Para mitigar dichos efectos, el Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización donde se aplican las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos laborales.

Las variables principales a las que se debe prestar especial atención para la prevención del tipo de riesgos a los que el trabajador puede enfrentarse en la realización del Trabajo de Fin de Máster son:

- Tiempo de permanencia requerida ante la pantalla, el cual puede ser de manera continua o discontinua.
- Tiempo de trabajo con la pantalla de visualización.
- Exigencia y grado de complejidad de la tarea que el operario tiene que realizar ante la pantalla de visualización.
- Necesidad de obtener información de manera rápida y precisa.

Los factores generales que se deben tener en cuenta para la prevención de riesgos laborales son:

- Seguridad (debido a contactos eléctricos, caída o golpes en el puesto de trabajo).
- Higiene industrial (iluminación, ruido y condiciones termo-higrométricas, transmisiones de virus en el ambiente de trabajo o bacterias nocivas a través del contacto en el teclado que podría acumular gran cantidad de estas).
- Ergonomía (fatiga visual, picores, percepción borrosa. Fatiga física y mental: ansiedad, irritabilidad o insomnio).

Real Decreto 488/1977 de 14 de abril**Artículo 1. Objeto.**

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.
2. Las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - a) Los puestos de conducción de vehículos o máquinas.
 - b) Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte.
 - c) Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - d) Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - e) Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - f) Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

1. Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
2. Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
3. Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo.

En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo.

2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:

- a) El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
 - b) El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
 - c) El grado de atención que exija dicha tarea.
3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.
 4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos

que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:

- a) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
 - b) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
 - c) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.
2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.
 3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación.

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto.
2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto.
3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado

2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Anexo

Disposiciones mínimas

Por todo lo dispuesto anteriormente, se va a definir el puesto de trabajo específico para la prevención de riesgos laborales y seguridad.

1. Equipo.

a) Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones. La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad. El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno. La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario. Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla. La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c) Teclado.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos. La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos. La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización. Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio. El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y ojos. El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable. La altura del mismo deberá ser regulable, el respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable. Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno.

a) Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b) Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado. El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberían instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla. Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f) Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. Interconexión ordenador/persona.

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

a) El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.

- b) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.
- c) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- d) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.
- e) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

3.2.2. Condiciones de especificaciones técnicas

Especificaciones de materiales y equipos

Hardware

El Hardware requerido para este proyecto debe ser capaz de soportar cómodamente los procesos, teniendo en cuenta que se realizarán simulaciones que ocuparán gran cantidad de tiempo. De entre los diferentes softwares empleados, PEGASUS es el que presenta unos requisitos de Hardware más concretos. De este modo, la computadora empleada deberá disponer, como mínimo, de un procesador Intel Pentium-n de al menos 350 MHz de velocidad, de 60 MB de disco duro disponible para la instalación, al menos 1 GB de disco duro disponible para el procesamiento de datos, con 5 GB recomendados, así como 128 Mb de memoria RAM disponibles, recomendándose 256 Mb para mejor funcionamiento. Se ha empleado un ordenador portátil de marca Lenovo que cumple las especificaciones mencionadas anteriormente.

Software

El principal obstáculo del software utilizado, PEGASUS, es el desconocimiento parcial del mismo y la dificultad para acceder a determinados módulos. El tratamiento de los ficheros RINEX también ha supuesto un trabajo tedioso y largo.

Los programas utilizados para la elaboración del proyecto:

- PEGASUS 4.8.4 y sus módulos Convertor, GNSS Solution, MFile Runner, Dynamics.
- Hatanaka.
- TEQC.

- PAG 1.3.
- WinSCP.
- Matlab.
- Google Earth.
- LaTeX.
- PDF Reader.
- Microsoft PowerPoint.
- Microsoft Excel.
- Línea de comandos CMD de la consola MS-DOS de windows.
- Editor de textos Notepad++.
- Google Drive.

Conexión a Internet

La conexión a internet ha sido necesaria y elemental en la evolución del proyecto, aunque no se ha precisado en las simulaciones, conversiones o concatenaciones. Se ha precisado para la descarga de datos, desde los ficheros RINEX de las estaciones, pasando por los ficheros SBAS obtenidos de la FTP de EDAS, incluyendo la descarga del software del que no se disponía y finalizando con la búsqueda de manuales y demás documentos que han contribuido a la redacción del proyecto. La transferencia de archivos entre alumno y tutor ha requerido una conexión a internet rápida y sin interrupciones.

Conocimientos previos

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster, se ha requerido de conocimientos previos en la rama de certificación y validación de procedimientos empleando GNSS, más concretamente en aquellos basados en SBAS. También eran necesarios conocimientos de Aeronavegación y en formato de transmisión de mensajes y archivos en el sector aeronáutico.

En el ámbito personal, son necesarias la autonomía, la perseverancia, predisposición y paciencia.

Conocimientos informáticos

En el ámbito de la simulación, es necesaria la familiarización con las herramientas que contribuirán a la consecución del proyecto y solución de problemas de forma rápida y eficiente. La corta familiarización previa con programas como PEGASUS, Hatanaka o TEQC ha supuesto una evolución más lenta del proyecto. Es recomendable un aprendizaje concurrente y un proceder multitarea para evitar caer en bloqueos o congestiones. No obstante, en programas como Matlab, existía una formación previa más que suficiente para el desarrollo de las partes que han hecho uso de él.

Material adicional

Es necesario acceder a documentos específicos del tema tratado, ya que la certificación y validación de procedimientos presenta unos requerimientos diferentes según el sistema a tratar. De este modo, dado que la mayoría de estos documentos no se encuentran traducidos al castellano, se recomienda el conocimiento del inglés para poder manejar la información.

Supervisión

El supervisor encargado del proyecto deberá tener experiencia demostrada y contrastada en la ejecución de proyectos relacionados con la certificación y validación de procedimientos GNSS, así como en el uso del software principal empleado para el mismo. Además, un porcentaje importante (al menos el 90 %) de dichos proyectos deberán haber sido llevados a cabo de forma satisfactoria en lo referido a plazos, presupuesto, cumplimiento de las especificaciones y aceptación por parte del cliente.

3.3. Presupuesto

3.3.1. Introducción

El presente documento muestra los costes que ha supuesto la realización del Trabajo de Fin de Máster "DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE APROXIMACIÓN EMPLEANDO GNSS/SBAS PARA EL AEROPUERTO DE TERUEL". En este capítulo se presentan los gastos de material, software, personal y de oficina. Más concretamente, en este proyecto no han sido necesarios materiales adicionales, sino tan sólo software y personal que lo haga funcionar. Forman parte de los presupuestos parciales que, en conjunto, constituyen el presupuesto total del proyecto. Los precios aplicados a los grupos de coste corresponden a tarifas legales vigentes, habiéndose realizado, en caso de necesidad, estimaciones coherentes. Debido a que el trabajo realizado en el presente proyecto está destinado a investigaciones internas del Departamento De Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría, en este precio no se incluye el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA). Si los resultados obtenidos fueran para un trabajo encomendado por alguna empresa externa al Departamento, sí que se hubieran añadido gastos generales, el beneficio económico y el IVA.

El coste de amortización se calcula según las Ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad (3.1)$$

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (3.2)$$

Donde:

- a: amortización en euros/año.
- VC: valor de compra en euros.
- VR: valor residual al cabo del período de amortización en euros.
- n: período de amortización en años.
- t_h : tasa horaria en euros/hora.
- h: horas trabajadas al año.

Los precios unitarios correspondientes al personal se calculan según las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = \left(\frac{\text{sem}}{\text{año}} - \frac{\text{sem}^{\frac{\text{vacaciones}}{\text{festivos}}}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{sem}} \quad (3.3)$$

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = (52 - 6) \cdot 40 = 1840 \frac{\text{horas}}{\text{año}} \quad (3.4)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{\frac{\text{Salario bruto anual}}{\text{Horas trabajadas}}}{\text{año}} \quad (3.5)$$

3.3.2. Estado de mediciones

Se definen en este apartado los recursos necesitados para la correcta realización del presente Trabajo de Fin de Máster.

Conjunto de equipos informáticos y *Software*.

Descripción	Unidades
Ordenador Portátil Lenovo	1
Licencia Microsoft Office 365	1
Licencia Matlab	1
Licencia Google Earth	1
Licencia LaTeX	1
Licencia PEGASUS 4.8.4	1
Licencia Hatanaka	1
Licencia TEQC	1
Licencia WinSCP	1

Tabla 3.1: Equipos informáticos y *Software*

Montaje e instalación del equipo informático.

Descripción	Unidades
Ordenador Portátil Lenovo	1

Tabla 3.2: Montaje e instalación de equipos informáticos y *Software*

Instalación del *software* específico.

Descripción	Unidades
Microsoft Office 365	1
Matlab	1
Google Earth	1
LaTeX	1
PEGASUS 4.8.4	1
Hatanaka	1
TEQC	1
WinSCP	1

Tabla 3.3: Instalación del *software* específico

Personal específico para el desarrollo del proyecto.

Descripción	Unidades
Profesor titular	2
Ingeniero Superior	1

Tabla 3.4: Personal específico

3.3.3. Desglose de costes unitarios

Coste de material y *software* unitario

- Equipo informático
 - Portátil: Se ha estimado el valor residual del 20% y un período de amortización de 1 año y medio.

$$a = \frac{600 - 120}{1,5} = 320 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (3.6)$$

$$t_h = \frac{320}{1840} = 0,174 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.7)$$

- *Software*. Se tiene en cuenta el coste anual de los *software* y se consideran amortizados en ese año de licencia y sin valor residual:
 - Licencia PEGASUS 4.8.4. El valor anual para trabajar con dicho software es nulo, es decir, se trata de un programa libre del que se puede disponer sin necesidad de adquirir una licencia mediante pago.

$$a = 0 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (3.8)$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.9)$$

- Licencia Hatanaka. Sucede lo mismo que con PEGASUS 4.8.4.

$$a = 0 \text{ euros año} \quad (3.10)$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.11)$$

- Licencia TEQC: De nuevo, se trata del mismo caso que los dos anteriores.

$$a = 0 \text{ euros año} \quad (3.12)$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.13)$$

- Licencia LaTeX. Este *software* no supone gasto alguno, ya que también es libre.

$$a = 0 \text{ euros año} \quad (3.14)$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.15)$$

- Licencia WinSCP. Finalmente, se repite la misma situación que con el resto de software mostrado hasta ahora.

$$a = 0 \text{ euros año} \quad (3.16)$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.17)$$

- Licencia Microsoft Office 365. El valor de una licencia anual estándar es de 60 euros.

$$a = \frac{60}{1} = 60 \text{ euros año} \quad (3.18)$$

$$t_h = \frac{60}{1610} = 0,030 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.19)$$

- Licencia Matlab. El valor de una licencia anual estándar de estudiante es de 69 euros.

$$a = \frac{69}{1} = 69 \text{ euros/año} \quad (3.20)$$

$$t_h = \frac{69}{1840} = 0,038 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.21)$$

Coste de personal cualificado unitario

- Coste asociado al Profesor Titular.

$$\text{Salario bruto anual} = 35000 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (3.22)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{35000}{1840} = 19,02 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.23)$$

- Coste asociado al Ingeniero Superior

$$\text{Salario bruto anual} = 22000 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (3.24)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{22000}{1840} = 11,96 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (3.25)$$

3.3.4. Desglose de costes totales

Coste de material y *software* total

Descripción	Horas	Importe [euros]
Ordenador Portátil Lenovo	732	127.37
Licencia Microsoft Office 365	50	1.50
Licencia Matlab	512	1.88
Licencia Google Earth	512	0
Licencia LaTeX	732	0
Licencia PEGASUS 4.8.4	300	0
Licencia Hatanaka	100	0
Licencia TEQC	100	0
Licencia WinSCP	50	0
Total	-	130.75

Tabla 3.5: Costes totales de material y *software*

Coste de personal cualificado total

Descripción	Horas	Importe [euros]
Profesor Titular 1	150	2853
Profesor Titular 2	150	2853
Ingeniero Superior	732	8754.72
Total	-	14460.72

Tabla 3.6: Costes totales de personal cualificado

3.3.5. Resumen del presupuesto total

Especie	Subtotal [euros]
Coste de material y software	130.75
Coste de personal cualificado	14460.72
Coste total del proyecto	14591.50

Tabla 3.7: Resumen del presupuesto total

El presupuesto total del presente Trabajo de Fin de Máster asciende a CATORCE MIL QUINIENTOS NOVENTA Y UN EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS.

Capítulo 4

Parte IV: Anexos

4.1. Anexos

Este proyecto incluye, además de la memoria, un total de 4 anexos que se incluyen en el CD del proyecto. En estos anexos están todos los programas elaborados, hojas de cálculo Excel usadas y los archivos analizados y simulados con PEGASUS.

Cabe destacar que los programas y hojas de cálculo adjuntas son originales y de creación propia, a excepción de las librerías *kml* y *geo* empleadas en Matlab, proporcionadas por los tutores del proyecto. Los archivos introducidos en PEGASUS han sido descargados de las fuentes oficiales.

4.1.1. Anexo 1 - Programas de Matlab

En este primer anexo se incluyen todos los programas de Matlab empleados para representar en Google Earth la aproximación RNP APCH LPV-200 a las cabeceras 18 y 36 del aeropuerto de Teruel. Se encuentra todo en la misma carpeta, pero se va a dividir en las dos cabeceras.

- Pista 18:
 - Apch18.m
 - franqueamiento18.m
 - OAS18.m
 - OAS18APVII.m
 - Obstaculos18.m
 - ProteccionLateral18.m
- Pista 36:
 - Apch36.m
 - franqueamiento36.m
 - OAS36.m
 - OAS36APVII.m
 - Obstaculos36.m
 - ProteccionLater36.m
- Archivos globales:
 - areaespera.m

- coordenadas.m
- distancias.m
- route_read.m

4.1.2. Anexo 2 - Hojas de Excel

El segundo anexo contiene una carpeta que incluye las hojas de Excel elaboradas durante el proyecto. Dichas hojas contienen los cálculos necesarios para el cálculo de las superficies OAS.

- OAS APV I - Carmen Furquet Gascón.xlsx
- OAS APV II - Carmen Furquet Gascón.xlsx
- OAS LPV - Carmen Furquet Gascón.xlsx

4.1.3. Anexo 3 - Archivos de PEGASUS

El tercer anexo contiene dos carpetas. En la primera se presentan los archivos procesados por PEGASUS empleados en el proyecto. La segunda incluye los resultados obtenidos.

En la primera de ellas se encuentra la siguiente relación de archivos:

- Carpeta 121: correspondiente al día 121 GPS (1 de mayo de 2018) donde están todos los archivos generados por el programa para ese día.
- Carpeta 122: correspondiente al día 122 GPS (2 de mayo de 2018) donde están todos los archivos generados por el programa para ese día.
- Carpeta 123: correspondiente al día 123 GPS (3 de mayo de 2018) donde están todos los archivos generados por el programa para ese día.
- Carpeta 124: correspondiente al día 124 GPS (4 de mayo de 2018) donde están todos los archivos generados por el programa para ese día.
- Carpeta 125: correspondiente al día 125 GPS (5 de mayo de 2018) donde están todos los archivos generados por el programa para ese día.

En la segunda carpeta, las imágenes recogen los resultados siguientes:

- 121: donde están los resultados de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en imágenes correspondientes al día 121 GPS (1 de mayo de 2018).

- 122: donde están los resultados de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en imágenes correspondientes al día 122 GPS (2 de mayo de 2018).
- 123: donde están los resultados de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en imágenes correspondientes al día 123 GPS (3 de mayo de 2018).
- 124: donde están los resultados de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en imágenes correspondientes al día 124 GPS (4 de mayo de 2018).
- 125: donde están los resultados de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en imágenes correspondientes al día 125 GPS (5 de mayo de 2018).

4.1.4. Anexo 4 - PDF de la estación TERU

Se recoge en el cuarto anexo el PDF con información de la estación de Teruel (TERU).

Bibliografía

- [1] Aeropuerto de Teruel: <http://www.aeropuertodeteruel.com>
- [2] Aeródromo de Caudé: <http://turoliense.blogspot.com.es/2014/07/aerodromo-de-caude-teruel-1937.html>
- [3] Noticias del Boeing 747: http://www.elperiodicodearagon.com/noticias/aragon/aeropuerto-teruel-estrena-aterrizaje-primer-boeing-747_874284.html
- [4] Historia del aeropuerto de Teruel: <http://www.rusadas.com/2016/03/el-aeropuerto-ruso-de-teruel.html>
- [5] Noticias del Airbus 330: <http://www.aeropuertodeteruel.com/en/news?start=27>
- [6] Geografía y clima de Teruel: https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_TeruelGeograf%C3%ADa
- [7] Imagen del Boeing 747: <http://www.transponder1200.com/cuantos-boeing-747-400-continuan-volando/>
- [8] Manual *Airport Planning* para el Boeing 747: http://www.boeing.com/resources/boeing-dotcom/commercial/airports/acaps/747_4.pdf
- [9] Características del Boeing 747-800: https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_747-8
- [10] Manual *Airport Planning* del Airbus 320: *Aircraft Characteristics airport and maintenance planning*
- [11] Características del Airbus 320: https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A320_family
- [12] Velocidades de aeronaves Boeing: <http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/arcandapproachspeeds.pdf>
- [13] Limitaciones del Airbus 320: <http://www.satavirtual.org/fleet/A320LIMITATIONS.PDF>
- [14] Cartas del aeropuerto: https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT_296_2017_AIR-AC_13_2017/AIP.html

- [15] Ensayos en vuelo para GBAS: https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_1_GBAS.html
- [16] Trayectorias en 4D: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/events/Presentations/120925-2nd-cns-4d-trajectory-management-dds.pdf
- [17] *Navigation Activities*: <http://www.eurocontrol.int/navigation-activities>
- [18] Diseño de la aproximación PBN: OACI Doc. 8168, Operación de aeronaves
- [19] Diseño de la aproximación PBN: OACI Doc. 9613, *Performance Based Navigation Manual* (PBN)
- [20] Diseño de la aproximación: OACI, Anexo 14, Aeródromos
- [21] PEGASUS: <https://www.eurocontrol.int/pegasus>
- [22] Imagen de la arquitectura GNSS: https://www.researchgate.net/publication/311935462_An_Approach_to_Compute_and_Modelize_Multipath_Errors_for_GNSS_Positioning_in_urban_environment/figures?lo=1
- [23] Información acerca de GPS: <http://www.navipedia.net/index.php/GPS>
- [24] Señal GPS: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [25] Imagen del sistema GPS: https://www.researchgate.net/publication/281619903_Tracking_of_satellites_by_using_Phased_Array_Antenna/figures?lo=1utm_source=googleutm_medium=organic
- [26] GLONASS: http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_General_Introduction
- [27] Galileo: http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_General_Introduction
- [28] Galileo: https://elpais.com/economia/2017/09/05/actualidad/1504611345_266687.html
- [29] Beidou: <http://www.infoespacial.com/mundo/2016/06/16/noticia-china-lanza-satelite-numero-navegacion-beidou.html>
- [30] Beidou: http://www.navipedia.net/index.php/BeiDou_General_Introduction
- [31] NAVIC: <https://www.geospatialworld.net/news/isro-add-one-satellite-navics-constellation-april/>
- [32] NAVIC: <http://www.navipedia.net/index.php/NAVIC>
- [33] QZSS: <http://www.navipedia.net/index.php/QZSS>

- [34] QZSS: <https://www.adslzone.net/2017/08/21/quasi-zenith-qzss-gps-japon/>
- [35] Sistemas de Aumentación: <https://www.gps.gov/systems/augmentations/>
- [36] ABAS: http://www.navipedia.net/index.php/Aircraft-Based_Augmentation_System
- [37] Fundamentos GBAS: http://www.navipedia.net/index.php/GBAS_Fundamentals
- [38] GBAS: http://www.navipedia.net/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_GBAS
- [39] Principios fundamentales SBAS: http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Fundamentals
- [40] Qué es SBAS: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>
- [41] WAAS: http://www.navipedia.net/index.php/WAAS_General_Introduction
- [42] WAAS según la FAA: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/
- [43] MSAS: http://www.navipedia.net/index.php/MSAS_Architecture
- [44] GAGAN: <https://www.isro.gov.in/applications/step-towards-initial-satellite-based-navigation-services-india-gagan-irns>
- [45] GAGAN: <http://www.navipedia.net/index.php/GAGAN>
- [46] Agencia GNSS EGNOS: <https://www.gsa.europa.eu/egnos/what-egnos>
- [47] EGNOS según Agencia Espacial Europea: https://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/EGNOS/What_is_EGNOS
- [48] EGNOS según Navipedia: http://www.navipedia.net/index.php/EGNOS_General_Introduction
- [49] EGNOS *user support*: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/index.php
- [50] Segmento tierra de EGNOS: http://www.navipedia.net/index.php/File:RIMS_sites.JPG
- [51] Arquitectura EGNOS: http://www.navipedia.net/index.php/File:EGNOS_architecture.JPG
- [52] RNAV y RNP: https://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/navegacion/programas/navegacion_area/conceptos.aspx
- [53] PBN: <https://greatbustardsflight.blogspot.com.es/2015/03/aproximaciones-rnp-rnp-apch-y-sus.html>

- [54] Implementación del sistema WAAS: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/approaches/
- [55] Implementación del servicio LPV-200: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/services/safety-life-service/real-time-performance/airports-availability
- [56] Implementación futura de LPV-200: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map
- [57] Estándar RTK: http://www.navipedia.net/index.php/RTK_Standards
- [58] RTK: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttextpid=S1852-77442014000100014
- [59] ERGNSS: <ftp://ftp.geodesia.ign.es/ERGNSS/horario.1s/>
- [60] PAG: <ftp://ftp.geodesia.ign.es/utilidades/PAG/>
- [61] TEQC: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>
- [62] IGN: <http://www.ign.es/web/ign/portal/inicio>
- [63] FTP de EDAS: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/services/edas-service/downloads
- [64] Manuales del programa PEGASUS incluidos en su carpeta de instalación
- [65] Almanagues GPS: <https://navcen.uscg.gov/?Do=gpsArchivespath=ALMA-NACS/YUMAyear=2018>